



*Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos,  
Canales y Puertos.*  
**UNIVERSIDAD DE CANTABRIA**



# **ANÁLISIS NUMÉRICO DE LA INFLUENCIA DE LOS CANALES DE NAVEGACIÓN EN LA CLIMATOLOGÍA PORTUARIA, DISEÑO Y OPERATIVIDAD**

Trabajo realizado por:  
***Mariana Cobo Rodríguez***

Dirigido:  
***Gabriel Díaz Hernández***

Titulación:  
**Máster Universitario en  
Ingeniería de Caminos, Canales y  
Puertos**

Santander, febrero de 2020

**TRABAJO FIN DE MASTER**

## **Análisis numérico de la influencia de los canales de navegación en la climatología portuaria, diseño y operatividad.**

Mariana Cobo Rodríguez

### **Resumen**

Los canales de navegación permiten el transporte marítimo, facilitando la entrada de los barcos al puerto, y son cada vez más necesarios en consonancia con el crecimiento en dimensiones de los grandes buques. Su diseño suele ser uno de los estudios últimos en obra marítima. Esto quiere decir que el diseño funcional, estructural y operativo del puerto se suele realizar sin tener en cuenta las dimensiones geométricas y ubicación final del canal de navegación.

El presente Trabajo Fin de Máster tiene como objetivo principal demostrar la influencia de los canales de navegación en la climatología portuaria, y por tanto su importancia de cara al diseño estructural de la obra de abrigo portuaria adyacente al canal de navegación. Se divide en dos fases. En primer lugar, la fase A, que constituye el experimento teórico-controlado, en la cual se llevará a cabo un análisis comparativo entre dos modelos numéricos comúnmente empleados para el trabajo de propagación de oleaje: los modelos SWAN y MSP, con el objetivo de poder identificar sus diferencias y la fiabilidad de sus predicciones, con relación al proceso de propagación y transformación del oleaje que discurre sobre un canal de navegación portuaria dragado sobre el terreno natural. En segundo lugar y para concluir, la fase B, que es la aplicación a un caso real (el puerto de Ghana) con el objetivo de cuantificar las diferencias en la estadística del oleaje extremal que condiciona el diseño último de las estructuras de abrigo.

Se sabe que la presencia del canal afectará a la propagación del oleaje y por tanto a la cantidad de energía que anualmente llega al puerto. Por ello, el objetivo final es cuantificar las variaciones que puede presentar la agitación portuaria interior y el diseño último comparativo de las piezas del manto principal de un dique en talud en las situaciones con y sin canal en un puerto localizado en Ghana, África.

**Palabras Clave:** Canal de navegación, puerto, dique, propagación, clima marítimo, MSP, SWAN, diseño, oleaje, altura de ola significativa, modelo numérico.

### **INTRODUCCIÓN**

Cuando el oleaje se propaga hacia zonas de menor profundidad, los cambios en la velocidad de propagación y longitud de onda modifican la dirección de propagación y la altura de ola. Si el oleaje incide normal a la batimetría, cambia la altura de ola y se asomera. Si incide oblicuamente, se produce asomeramiento y refracción. Si en su propagación las ondas encuentran un obstáculo, se reflejan y se difractan contra el mismo. Finalmente, se producirá la rotura en las playas.

Debido a estos procesos asociados a cambios en el fondo marino, cualquier perturbación abrupta en éste provocaría un notable cambio en la propagación del oleaje. Esto sucede con el canal de navegación. A medida que las ondas se propagan a través de un canal de

navegación, ocurren estos procesos físicos. Los más importantes son la refracción y la difracción, y en menor medida la reflexión (Zwamborn y Grieve, 1974).

Partiendo de la hipótesis de que la presencia del canal afecta al oleaje, se establece que el efecto del canal en el oleaje depende de la dirección relativa con la orientación del canal y del periodo del oleaje (Grey, Cruickshank, Beresford y Tozer, 2010).

El objetivo principal de este trabajo es evaluar numéricamente el efecto de los canales de navegación en el oleaje que incide en playas y puertos, de forma que se demuestre su importancia de cara al diseño de estructuras portuarias.

### **METODOLOGÍA**

En la fase A (experimento teórico), para caracterizar los procesos de propagación

del oleaje, se diseña un laboratorio numérico de carácter realista y se propondrán una serie de forzamientos que se utilizarán por los modelos numéricos de distinta naturaleza, los modelos SWAN y MSP para ejecutar 4 escenarios distintos y poder realizar un análisis comparativo.

En la fase B (caso real de Ghana) se cuenta con la serie histórica (hindcast) de oleaje, y se trasladará esta serie a unos puntos de control, propagando con SWAN y MSP teniendo en cuenta la batimetría real. Para ello, se seleccionarán 20 estados de mar representativos del clima marítimo.

Finalmente, con el clima marítimo obtenido en los puntos de control, se calculan los pesos de las piezas del dique en talud en cada uno de los 4 escenarios que se plantean

## RESULTADOS

El estudio teórico considera un canal trapezoidal con una anchura en el fondo de 350 m y una profundidad de 20 m. El talud en los laterales del canal es 1V:1H y la pendiente de la batimetría es 1:200.

La sensibilidad de la respuesta del canal al forzamiento de la onda incidente se probó simulando períodos de onda de 7 y 14 s y direcciones de onda medias de 0°, 15°, 30° y 45°, con una altura de ola significativa ( $H_s$ ) fija de 1 m.

Tras el estudio, se puede ver que, mientras que el modelo SWAN no muestra todos los procesos esperados (subestima las condiciones de oleaje), el MSP sí lo hace, es decir, propaga mejor el oleaje.

Por otro lado, tras la ejecución del caso real y el cálculo del peso de las piezas del dique ( $W_{50}$ ) en cada caso, se obtienen los resultados mostrados en la siguiente tabla.

		$H_s$ diseño (m)	$W_{50}$ (kg)
Escenario 1	SWAN sin canal	3,3	2018
Escenario 2	SWAN con canal	3,9	3332
Escenario 3	MSP sin canal	3,3	2018
Escenario 4	MSP con canal	4,7	5831

Encontrándose importantes diferencias en los pesos nominales de los cubos calculados con las distintas alternativas de análisis del fenómeno de propagación.

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Tras el experimento teórico, se puede concluir que el modelo SWAN (comúnmente empleado para este tipo de estudios de clima marítimo portuario) resuelve muy bien el asomeramiento, la refracción y la propagación del oleaje, pero resuelve mal la difracción y no tiene en cuenta la pseudo-reflexión que induce el canal sumergido. Sin embargo, el modelo MSP está preparado para resolver mejor la difracción y la pseudo-reflexión. Por tanto, el modelo MSP propaga mejor el oleaje.

Analizando la tabla obtenida tras el caso real, se concluye que los modelos SWAN y MSP se comportan de forma parecida, ya que en el caso sin canal se obtiene el mismo peso de las piezas del dique (2018 kg). En segundo lugar, se demuestra que la presencia del canal afecta a la altura de ola significativa y por tanto, al peso de las piezas, ya que se obtienen resultados diferentes a la situación sin canal. Además, también se demuestra que el modelo SWAN, con canal, subestima la altura de ola significativa de diseño (es menor que la obtenida con el MSP).

En conclusión, la hipótesis inicial es correcta. Los estudios realizados con el modelo SWAN son adecuados siempre y cuando no haya efectos locales por el canal. Cuando se incorpora un canal de navegación, las condiciones de oleaje cambian y será necesario aumentar el tamaño de las piezas del dique.

## REFERENCIAS

- Zwamborn, J.A. y Grieve, G. (1974). "Wave attenuation and concentration associated with harbour approach channels" en *14th International Conference on Coastal Engineering*. Copenhagen. 24-28.
- Grey, S. M., Cruickshank, I. C., Beresford, P. J. y Tozer, N. P. (2010). "The impact of navigation channels on berth protection" en *Proceedings of the ICE – Civil Engineering*. Vol. 163 (5), pp. 49-54.

## Numerical analysis of the influence of navigation channels in port climatology, design and operativity.

Mariana Cobo Rodríguez

### Abstract

Navigation channels allow maritime transport, making it easier for ships to entry the port. They are increasingly necessary because of the size growth of large ships. Their design is usually one of the latest studies in maritime works. This means that the functional, structural and operational design of the port is often made without taking into account the geometric dimensions and final location of the navigation channel.

The main objective of this Master final project is to demonstrate the influence of navigation channels on maritime climate, and therefore their importance for the structural design of the breakwater close to the navigation channel. This project is divided into two phases. Firstly, phase A, which constitutes the theoretical-controlled experiment, in which a comparative analysis between two different numerical models (commonly used for wave propagation) will be carried out: the SWAN and MSP models, with the aim of being able to identify their differences and the reliability of their predictions in relation to the process of propagation and transformation of the waves that runs over a port navigation channel dredged on natural terrain. Secondly and to conclude, phase B, which is the application to a real case (the port of Ghana) with the objective of quantifying the extreme wave conditions for the final design of the breakwater.

It is known that the presence of the channel will affect wave propagation and therefore the amount of energy that reaches the port annually. Therefore, the final goal is to quantify the variations that may occur in the inner harbour agitation and the ultimate comparative design of the main mantle pieces of a sloping breakwater in the situations with and without the channel in a port located in Ghana, Africa.

**Keywords:** Navigation channel, harbour, breakwater, propagation, maritime climate, MSP, SWAN, design, waves, significant wave height, numerical model.

### INTRODUCTION

When waves propagate into shallower areas, changes in the propagation speed and wavelength change the direction of propagation and wave height. If waves have a normal impact on the bathymetry, the wave height changes, this effect is called shoaling. If waves come with an angle, there is wave shoaling and refraction. If waves encounter an obstacle in their propagation, the wave is reflected and diffracted against it. At the end, the breakage occurs on the beaches.

Due to these processes associated with changes in the seafloor, any abrupt disturbance to the seafloor would cause a great change in wave propagation. This is what happens with a navigation channel. As waves propagate through a navigation channel, these physical processes occur. The most important are refraction and

diffraction, and to a lesser extent reflection (Zwamborn and Grieve, 1974).

Based on the hypothesis that the presence of the channel affects waves, it is established that these effects of the channel on waves depend firstly on the direction relative to the orientation of the channel and secondly on the period of the waves (Grey, Cruickshank, Beresford and Tozer, 2010).

The aim of this project is to numerically evaluate the effect of navigation channels on waves that affect beaches and ports, in order to demonstrate their importance for the design of port structures.

### METHODOLOGY

In phase A (theoretical experiment), to characterize the wave propagation processes, a realistic numerical laboratory is designed and a series of forces will be proposed to be used by the SWAN and MSP



numerical models to execute 4 different scenarios and to be able to carry out a comparative analysis.

In phase B (real case of Ghana) the historical series (hindcast) of waves is available, and this series will be transferred to some control points, propagating with SWAN and MSP taking into account the real bathymetry. For this purpose, 20 sea states representative of the maritime climate will be selected.

Finally, with the maritime climate obtained in the control points, the weights of the pieces of the breakwater required in each of the 4 scenarios are calculated.

## RESULTS

The theoretical study considers a trapezoidal channel with a width at the bottom of 350 m and a depth of 20 m. The slope on the sides of the channel is 1V:1H and the bathymetry slope is 1:200.

The sensitivity of the channel response to the incident wave forcing was tested by simulating 7 and 14 s wave periods and 0°, 15°, 30° and 45° mean wave directions, with a fixed significant wave height ( $H_s$ ) of 1 m. After the study, it can be seen that while the SWAN model does not show all the expected processes (it underestimates the wave conditions), the MSP does, i.e. it propagates the wave better.

On the other hand, after the execution of the real case and the calculation of the weight of the pieces of the breakwater ( $W_{50}$ ) in each case, the results shown in the following table are obtained.

		Design $H_s$ (m)	$W_{50}$ (kg)
Scenario 1	SWAN without channel	3,3	2018
Scenario 2	SWAN with channel	3,9	3332
Scenario 3	MSP without channel	3,3	2018
Scenario 4	MSP with channel	4,7	5831

There are important differences in the nominal weight of the cubes calculated with

the different alternatives of analysis of the propagation phenomenon.

## DISCUSSION AND CONCLUSIONS

After the theoretical experiment, it can be concluded that the SWAN model (commonly used for this type of maritime climate studies in ports) solves very well shoaling, refraction and propagation of the wave, but it solves badly the diffraction and does not take into account the pseudo-reflection induced by the submerged channel. However, MSP model is prepared to resolve diffraction very well and the pseudo-reflection. Therefore, the MSP model propagates waves better.

Analyzing the table obtained after the real case, it can be concluded first of all that the SWAN and MSP models behave in a similar way, since without channel the weight of the pieces of the breakwater obtained is the same (2018 kg). Secondly, it is shown that the presence of the channel affects the significant wave height and therefore the weight of the breakwater, as different results are obtained from the situation without the channel. Furthermore, it is also shown that the SWAN model with channel underestimates the significant wave height, since it is lower than that obtained with the MSP.

In conclusion, the initial hypothesis is correct. The studies carried out with the SWAN model for maritime climate for design purposes are adequate as long as there are no local effects because of the channel. When a navigation channel is incorporated, wave conditions change and it will be necessary to increase the size of the pieces of the breakwater.

## REFERENCES

- Zwamborn, J.A. y Grieve, G. (1974). "Wave attenuation and concentration associated with harbour approach channels" in *14th International Conference on Coastal Engineering*. Copenhagen. 24-28.
- Grey, S. M., Cruickshank, I. C., Beresford, P. J. y Tozer, N. P. (2010). "The impact of navigation channels on berth protection" in *Proceedings of the ICE – Civil Engineering*. Vol. 163 (5), pp. 49-54.

## ÍNDICE

Resumen .....	2
Abstract.....	3
ÍNDICE DE FIGURAS.....	5
ÍNDICE DE TABLAS.....	7
1. INTRODUCCIÓN .....	8
1.1. Procesos de propagación del oleaje .....	8
1.2. Procesos del oleaje involucrados en los canales de navegación .....	13
1.3. La influencia de los canales de navegación en la ingeniería de costas y puertos.....	17
2. OBJETIVOS.....	20
3. METODOLOGÍA .....	20
3.1. Introducción .....	20
3.2. Descripción del montaje de los experimentos.....	21
3.3. Resultados .....	21
4. FASE A: EXPERIMENTO TEÓRICO .....	21
4.1. Geometría del experimento .....	22
4.2. Forzamientos .....	32
4.3. Modelos numéricos empleados .....	34
4.3.1. Modelo SWAN.....	34
4.3.2. Modelo MSP.....	37
4.3.3. Resumen .....	39
4.4. Escenarios de ejecución y montaje de los modelos.....	40
4.4.1. Escenarios .....	40
4.4.2. Montaje.....	40
4.4.2.1. SWAN .....	40
4.4.2.2. MSP .....	42
4.5. Resultados .....	45
4.5.1. Resultados sin canal para ambos modelos .....	45
4.5.1.1. SWAN .....	45
4.5.1.2. MSP .....	47
4.5.2. Resultados comparativos con canal para ambos modelos .....	49
4.5.2.1. Resultados para tipo a) Olas propagándose longitudinalmente .....	50
4.5.2.2. Resultados para tipo b) Olas propagándose bajo un ángulo menor que el crítico .....	52
4.5.2.3. Resultados para tipo c) Olas propagándose bajo un ángulo mayor que el crítico .....	55

4.5.2.4. Resumen de resultados.....	57
4.6. Conclusiones generales del experimento teórico .....	58
5. FASE B: CASO REAL .....	59
5.1. Introducción .....	59
5.2. Descripción de la zona de estudio .....	59
5.3. Metodología .....	62
5.4. Resultados .....	66
5.4.1. Resultados comparativos sin canal .....	67
5.4.2. Resultados comparativos con canal .....	71
5.5. Series en los puntos de control .....	77
5.5.1. Punto de control 1: Morro.....	78
5.5.1. Punto de control 2: Centro del canal .....	80
5.6. Cálculo del tamaño de piezas del dique comparativo (Diseño) .....	82
5.6.1. SWAN sin canal .....	84
5.6.2. MSP sin canal .....	85
5.6.3. SWAN con canal.....	85
5.6.4. MSP con canal .....	85
6. CONCLUSIONES GENERALES.....	86
7. BIBLIOGRAFÍA .....	87

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Procesos de propagación del oleaje.....	8
Figura 2.	Asomeramiento.....	9
Figura 3.	Refracción.....	9
Figura 4.	Efectos de la refracción en playas y cabos.....	10
Figura 5.	Difracción .....	11
Figura 6.	Conceptos de ondas .....	12
Figura 7.	Rotura del oleaje .....	12
Figura 8.	Olas propagándose en 3 direcciones diferentes por el canal de navegación: a) Longitudinalmente, b) bajo el ángulo crítico y c) bajo un ángulo mayor que el crítico.....	15
Figura 9.	Refracción del oleaje a través de un canal: a) por oleaje paralelo al eje del canal, b) por oleaje con la misma frecuencia pero diferentes ángulos de aproximación que el crítico, c) por oleaje con ángulo de aproximación igual que el crítico pero diferentes frecuencias.....	16
Figura 10.	Representación conceptual del canal de navegación considerado en el estudio...	22
Figura 11.	Post-Panamax.....	23
Figura 12.	Dimensiones típicas de un barco .....	23
Figura 13.	Anchura de las vías de tramo recto con un solo carril de navegación .....	28
Figura 14.	Ángulo de deriva $\beta$ .....	29
Figura 15.	Resguardos $rh_{sm}$ y $rh_{sd}$ .....	30
Figura 16.	Experimento con canal.....	31
Figura 17.	Experimento sin canal .....	31
Figura 18.	Grado de apuntamiento del espectro $\gamma$ .....	33
Figura 19.	Ángulos Náuticos.....	34
Figura 20.	Dominio SWAN.....	41
Figura 21.	Dominios .....	43
Figura 22.	Dominio MSP, West W .....	44
Figura 23.	Dominio MSP, NorthWest NW .....	44
Figura 24.	Caso 1: Dir=270° (0°), T=7s .....	45
Figura 25.	Caso 2: Dir=270° (0°), T=14s .....	45
Figura 26.	Caso 3: Dir=285° (15°), T=7s .....	45
Figura 27.	Caso 4: Dir=285° (15°), T=14s .....	45
Figura 28.	Caso 5: Dir=300° (30°), T=7s .....	46
Figura 29.	Caso 6: Dir=300° (30°), T=14s .....	46
Figura 30.	Caso 7: Dir=315° (45°), T=7s .....	46
Figura 31.	Caso 8: Dir=315° (45°), T=14s .....	46
Figura 32.	Caso 1: Dir=270° (0°), T=7s .....	47
Figura 33.	Caso 2: Dir=270° (0°), T=14s .....	47
Figura 34.	Caso 3: Dir=285° (15°), T=7s .....	47
Figura 35.	Caso 4: Dir=285° (15°), T=14s .....	47
Figura 36.	Caso 5: Dir=300° (30°), T=7s .....	48
Figura 37.	Caso 6: Dir=300° (30°), T=14s .....	48
Figura 38.	Caso 7: Dir=315° (45°), T=7s .....	48
Figura 39.	Caso 8: Dir=315° (45°), T=14s .....	48
Figura 40.	Olas propagándose en 3 direcciones diferentes por el canal de navegación: a) Longitudinalmente, b) bajo el ángulo crítico y c) bajo un ángulo mayor que el crítico.....	49
Figura 41.	Caso 1: Dir=270° (0°), T=7s .....	50
Figura 42.	Caso 2: Dir=270° (0°), T=14s .....	51

Figura 43.	Caso 3: Dir=285° (15°), T=7s .....	52
Figura 44.	Caso 4: Dir=285° (15°), T=14s .....	53
Figura 45.	Caso 5: Dir=300° (30°), T=7s .....	54
Figura 46.	Caso 6: Dir=300° (30°), T=14s .....	54
Figura 47.	Caso 7: Dir=315° (45°), T=7s .....	55
Figura 48.	Caso 8: Dir=315° (45°), T=14s .....	56
Figura 49.	Localización de la República de Ghana .....	59
Figura 50.	Batimetría y zona del puerto con canal .....	60
Figura 51.	Batimetría con canal.....	60
Figura 52.	Puerto objeto de estudio .....	61
Figura 53.	20 estados de mar seleccionados por el programa IH_MaxDiss.exe .....	62
Figura 54.	Modelos SWAN y MSP, batimetría con canal en el caso real .....	64
Figura 55.	Contornos SWAN y MSP en el caso real.....	65
Figura 56.	Caso 5: Porcentaje de ocurrencia 42%, sin canal SWAN vs MSP. ....	67
Figura 57.	Caso 1: Porcentaje de ocurrencia 21%, sin canal SWAN vs MSP. ....	68
Figura 58.	Caso 17: Porcentaje de ocurrencia 12%, sin canal SWAN vs MSP. ....	68
Figura 59.	Caso 4: Porcentaje de ocurrencia 7%, sin canal SWAN vs MSP. ....	69
Figura 60.	Caso 9: Porcentaje de ocurrencia 4%, sin canal SWAN vs MSP. ....	69
Figura 61.	Caso 15: Porcentaje de ocurrencia 4%, sin canal SWAN vs MSP. ....	70
Figura 62.	Caso 5: Porcentaje de ocurrencia 42%, con canal SWAN vs MSP. ....	71
Figura 63.	Caso 1: Porcentaje de ocurrencia 21%, con canal SWAN vs MSP. ....	72
Figura 64.	Caso 17: Porcentaje de ocurrencia 12%, con canal SWAN vs MSP. ....	73
Figura 65.	Caso 4: Porcentaje de ocurrencia 7%, con canal SWAN vs MSP. ....	74
Figura 66.	Caso 9: Porcentaje de ocurrencia 4%, con canal SWAN vs MSP. ....	75
Figura 67.	Caso 15: Porcentaje de ocurrencia 4%, con canal SWAN vs MSP. ....	76
Figura 68.	Puntos de control .....	77
Figura 69.	Régimen Extremal, Caso SWAN sin canal.....	78
Figura 70.	Régimen Extremal, Caso MSP sin canal.....	78
Figura 71.	Régimen Extremal, Caso SWAN con canal. ....	79
Figura 72.	Régimen Extremal, Caso MSP con canal. ....	79
Figura 73.	Régimen Medio, Caso SWAN sin canal.....	80
Figura 74.	Régimen Medio, Caso MSP sin canal. ....	80
Figura 75.	Régimen Medio, Caso SWAN con canal. ....	81
Figura 76.	Régimen Medio, Caso MSP con canal. ....	81
Figura 77.	IRE, ISA y vida útil mínima en función del tipo de área abrigada.....	82
Figura 78.	ISA y probabilidad conjunta de fallo para ELU y Pf <sub>ELS</sub> .....	83

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Tipos de rotura .....	18
Tabla 2.	Dimensiones del Canal de Navegación .....	22
Tabla 3.	Dimensiones típicas de los portacontenedores (Post-Panamax).....	24
Tabla 4.	Resguardos para seguridad y control de la maniobrabilidad del buque ( $rv_{sm}$ ) y margen de seguridad ( $rv_{sd}$ ).....	26
Tabla 5.	Forzamientos.....	33
Tabla 6.	Comparación SWAN vs MSP.....	39
Tabla 7.	Escenarios de ejecución, caso teórico.....	40
Tabla 8.	Asociación de los casos con las posibilidades de propagación .....	50
Tabla 9.	Resumen Casos con Canal, SWAN vs MSP .....	57
Tabla 10.	Escenarios de ejecución, caso real. ....	63
Tabla 11.	20 casos ejecutados .....	66
Tabla 12.	6 casos seleccionados.....	67
Tabla 13.	Caso 1 vs Caso 5 .....	72
Tabla 14.	Caso 4 vs Caso 1 .....	74
Tabla 15.	Caso 9 vs Caso 5 .....	75
Tabla 16.	Caso 15 vs Caso 17 .....	76
Tabla 17.	Valores máximos de la función de estabilidad, $\Psi$ . Bloques paralelepípedicos de hormigón. De Losada y Desiré (1985). ....	84
Tabla 18.	Tabla final de resultados en los escenarios ( $H_s$ , $W_{50}$ , $D_{50}$ ) .....	86



## 1. INTRODUCCIÓN

Los canales de navegación son necesarios para el transporte marítimo, permitiendo que los barcos puedan acceder al puerto, generalmente bajo restricciones del calado natural disponible. El diseño de este canal (su trazado, profundidad, forma, orientación, etc.) suele ser uno de los estudios que se realizan al final y tras el diseño portuario en obra marítima. Esto quiere decir que todo el diseño estructural, funcional y en planta del puerto se hace comúnmente sin tener en cuenta el canal de navegación.

Por otro lado, en la actualidad y por motivos económicos (como la reducción de los costes por tonelada-km de carga a medida que aumenta el tamaño de los buques), se construyen barcos de mayor tamaño. Esto conlleva la necesidad de aumentar las dimensiones de canales de navegación existentes, de forma que permitan el transporte marítimo de una forma segura, lo cual conlleva a una futura modificación del comportamiento del oleaje que se propaga sobre estas áreas dragadas.

La presencia del canal afectará a la propagación del oleaje y por tanto, a la cantidad de energía media anual que llega al puerto. Puesto que las condiciones de oleaje en el puerto se verán afectadas por la presencia del canal, el diseño funcional, estructural y en planta del puerto se va a ver también afectado por el canal de navegación, al igual que el diseño de las posibles playas adyacentes.

Es en este contexto donde se enmarca este Trabajo Fin de Máster.

### 1.1. Procesos de propagación del oleaje

Cuando el oleaje se propaga en profundidades progresivamente decrecientes, los cambios en la velocidad de propagación o celeridad ( $c$ ) y en la longitud de onda ( $L$ ), modifican la dirección de propagación y la altura de las olas individuales. Si el oleaje incide normalmente a la batimetría, la modificación de la longitud de onda y de la velocidad de propagación sólo afecta a la altura de ola y al proceso de propagación se le denomina asomeramiento. Si el oleaje incide oblicuamente a la batimetría, se produce conjuntamente asomeramiento y refracción. Si en su propagación las ondas encuentran un obstáculo, el oleaje se refleja y se difracta contra el mismo. A medida que disminuye la profundidad, el frente se vuelve más peraltado y cuando la velocidad de las partículas en la parte superior de la cresta supera la celeridad de la onda, se produce la rotura en las playas.

*Figura 1. Procesos de propagación del oleaje*

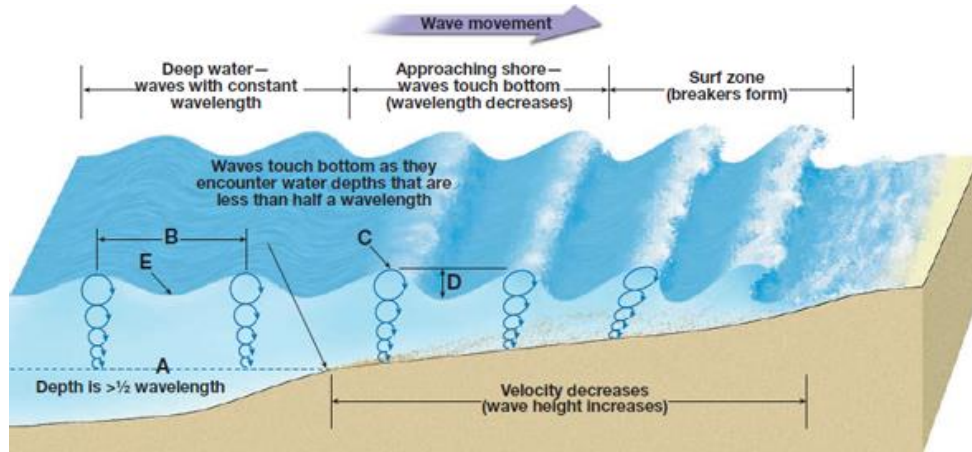


*Fuente: Apuntes del Máster Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos.*

### Asomeramiento

Cuando una onda se aproxima a la costa, al variar la profundidad se produce un cambio en la altura de ola  $H$  (generalmente aumento) y en la longitud de onda  $L$  (disminuye). Por tanto, el asomeramiento también es causado por cambios de profundidad, pero a diferencia de la refracción, es el cambio de olas debido a las variaciones de profundidad en la dirección de propagación y no debido a las variaciones de profundidad en la dirección lateral.

Figura 2. Asomeramiento

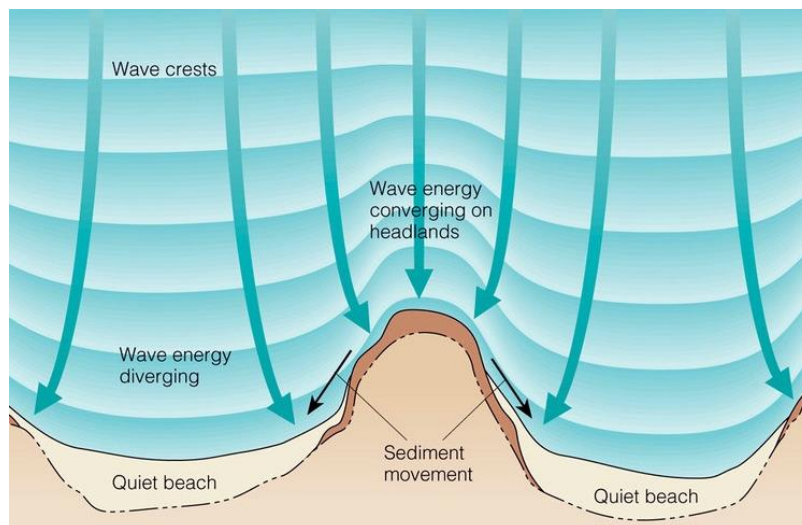


Fuente: Google

### Refracción

La refracción tiene lugar cuando un tren de ondas incidiendo oblicuamente (bajo un ángulo) sobre la costa, encuentra un cambio de profundidad. Cuando esto ocurre, una parte del frente de la onda viaja en aguas más someras que el resto de la cresta, con una consiguiente reducción en la velocidad de propagación o celeridad de fase (las olas en aguas más profundas viajan más rápido que en aguas poco profundas), lo cual produce el giro del frente. Este tipo de fenómeno se presenta también cuando el frente de ondas se encuentra con una corriente.

Figura 3. Refracción



Fuente: Google

Este cambio en la velocidad de propagación a medida que varía la profundidad al acercarse a la costa se demuestra con la relación de dispersión:

$$c = \sqrt{\frac{g}{k}} \times \tanh(k \times h)$$

Donde:  $k = \frac{2 \times \pi}{L}$  es el número de onda

c es la celeridad

L es la longitud de onda

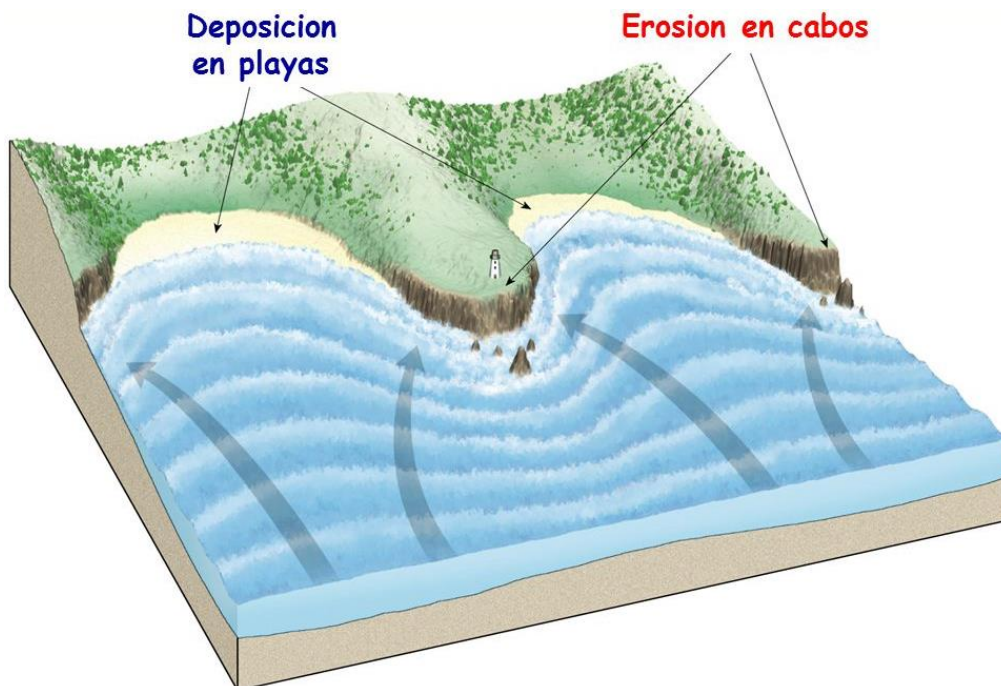
g es la gravedad

h es la profundidad

Como se puede ver, la ecuación anterior implica que al aumentar la profundidad (h) aumenta la celeridad (c) y viceversa (es decir, la cresta de la onda se mueve más rápido en aguas profundas que en aguas poco profundas). Como consecuencia, para las direcciones de incidencia oblicuas, la cresta gira hacia aguas poco profundas.

A medida que las olas se acercan a la costa, la parte del frente en menor profundidad se propaga a menor velocidad y la parte en mayores profundidades continúa a su celeridad original. De esta forma se genera refracción, los frentes tienden a ponerse paralelos a la costa y la energía se concentra en cabos y se dispersa en bahías.

Figura 4. Efectos de la refracción en playas y cabos



Fuente: Google



### Difracción

El proceso de difracción se pone de manifiesto como la cesión lateral de energía, perpendicularmente a la dirección dominante de propagación.

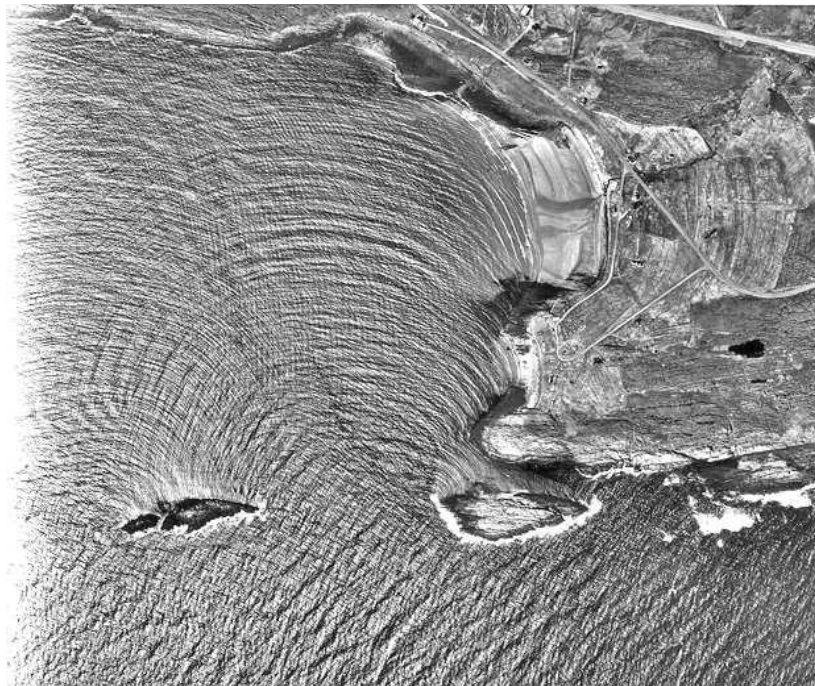
Es un fenómeno en el que se produce la cesión lateral de energía a una zona de sombra cuando la amplitud presenta una discontinuidad o grandes variaciones a lo largo de una cresta. Esto puede producirse cuando las olas se encuentran con una estructura o cuando pronunciados efectos de la refracción conducen a singularidades en la amplitud de onda.

Tiene una importancia especial en el diseño de puertos y obras de protección.

El resultado es un cambio en la dirección (ángulo de incidencia) y la altura de las olas (H).

El efecto de difracción es más fuerte para las ondas largas que para las cortas. En consecuencia, la disminución de la altura de las olas es mayor para las ondas cortas (ondas de alta frecuencia) que para las ondas largas (ondas de baja frecuencia).

*Figura 5. Difracción*



*Fuente: Google*

### Reflexión y transmisión

Cuando las olas golpean una estructura permeable, parte de su energía será absorbida, reflejada y posiblemente transmitida a través de la estructura. La cantidad de energía de las olas que se transmite, refleja o absorbe depende de las características de las ondas entrantes, la geometría y la permeabilidad de la estructura.

La transmisión de la energía de las olas puede ser a través o sobre una estructura. Este es un fenómeno importante durante las condiciones de tormentas extremas en las que los rompeolas están siendo superados. La altura de onda transmitida es menor que la altura de onda de las ondas incidentes. Además, el período medio de ola suele variar en comparación con el período de ola incidente.

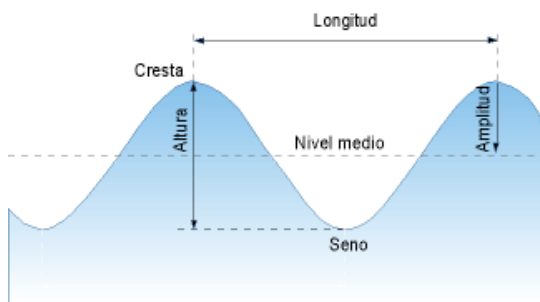
### Fricción por el fondo

A medida que el oleaje se acerca a la costa, el efecto del fondo comienza a afectar más. A partir de la teoría lineal del oleaje se puede deducir que una onda comienza a sentir la presencia del fondo cuando la profundidad en la que se encuentra es  $h < L/2$ , donde  $L$  es la longitud de la onda y  $h$  la profundidad del perfil. Como consecuencia de esta interacción de las ondas con el fondo el tren de onda u oleaje se transforma existiendo varios de los procesos incluidos en la transformación. Estos procesos de transformación se traducen fundamentalmente en: variaciones en la altura de la ola y en la dirección de propagación. La disipación en el proceso de la transformación del oleaje se produce por diferentes mecanismos. La **fricción por fondo**, inducida por los esfuerzos tangenciales que se producen en la capa límite más cercana al fondo da lugar a una importante disipación de energía. Sin embargo, el mecanismo disipador de energía por excelencia en aguas poco profundas es la rotura, como se muestra a continuación.

### Rotura

Cuando la profundidad se reduce, las ondas pierden su simetría con respecto al nivel medio, presentando crestas más pronunciadas y cortas, mientras que los senos son menos profundos y más largos que los correspondientes a una onda sinusoidal.

Figura 6. Conceptos de ondas



Fuente: Google

Figura 7. Rotura del oleaje



Fuente: Google

El perfil de la onda va cambiando debido a que aumenta el peralte (Altura de ola  $H$ / Longitud de onda  $L$ ) y disminuye la celeridad de la onda. Cuando el peralte sobrepasa un determinado valor, la onda se hace inestable y deja de mantener la forma. El frente se vuelve más pendiente que la trasera de la onda y las velocidades en la parte superior de la cresta se aproximan a la celeridad de la onda. Cuando la velocidad de las partículas en la parte superior de la cresta supera la celeridad de la onda, las partículas escapan de la cresta, lanzándose hacia delante, produciéndose la rotura de la onda. Este chorro de agua lanzado penetra de nuevo en la base de la onda atrapando aire en el túnel y provocando una gran turbulencia. Al cabo de una determinada distancia, denominada zona de rotura, el proceso de rotura se normaliza y la onda toma la forma de un resalto hidráulico móvil o bore, con un frente casi vertical turbulento (rodillo o roller) y una parte trasera casi horizontal dominada por la turbulencia dejada por el paso del rodillo. Esta zona de rotura normalizada se denomina zona de rompientes.

El número de Iribarren  $I_r$  o parámetro de rompientes está universalmente aceptado como controlador del tipo de rotura:

$$I_r = \frac{\tan \beta}{\sqrt{\frac{H}{L_0}}}$$

## 1.2. Procesos del oleaje involucrados en los canales de navegación

Debido a los procesos mencionados previamente (refracción, difracción, asomeramiento, etc.) que siente el fondo, cualquier perturbación abrupta en el fondo provocaría un cambio también abrupto en la propagación del oleaje (tanto en amplitud, energía, dirección, periodo y velocidad). Por tanto, en este Trabajo Fin de Máster, se verificará el efecto del canal dragado en el oleaje.

Para permitir la entrada segura de barcos en un puerto, ésta debe ser suficientemente ancha y profunda. Para alcanzar esta profundidad de agua necesaria, se dragan canales de aproximación que pueden alcanzar varios kilómetros de longitud y dragados del orden de decenas de metros.

A medida que las ondas se propagan a través de un canal de navegación, ocurren muchos procesos físicos, incluyendo: refracción, difracción, reflexión, asomeramiento y fricción de fondo entre otros. Los más importantes son la refracción y la difracción, y en menor medida la reflexión (Zwamborn y Grieve, 1974).

Según la teoría de la refracción lineal, existe un ángulo crítico que determina si las ondas pueden cruzar el canal o no, es decir, si se transmiten o reflejan. De acuerdo con la ley de Snell, este ángulo crítico depende de las celeridades y los ángulos dentro y fuera del canal, que están relacionados por:

$$\frac{\sin \theta_{out}}{c_{out}} = \frac{\sin \theta_{in}}{c_{in}}$$

El máximo ángulo de las ondas de propagación dentro del canal para el que no se produce ninguna reflexión es de 90°. El uso de este ángulo con la ley de Snell da el ángulo crítico, presentado en la Ecuación (1). Para profundidades de agua de transición, la celeridad de fase se da en la Ecuación (2).

$$\theta_{cr} = \arccos\left(\frac{c_{out}}{c_{in}}\right) \quad (1)$$

$$c = \frac{g \times T}{2 \times \pi} \times \tanh(k \times h) \quad (2)$$

Donde:  $\theta_{cr}$  = Ángulo crítico (°)

$c_{out}$  = celeridad del oleaje fuera del canal (m/s)

$c_{in}$  = celeridad del oleaje dentro del canal (m/s)

$c$  = celeridad del oleaje en aguas de transición (m/s)

$T$  = periodo del oleaje (s)

$g$  = aceleración gravedad ( $m^2/s$ )

$h$  = profundidad de agua (m)

$k$  = número de onda (rad/s)

Partiendo de la hipótesis mencionada anteriormente con relación a la presencia del canal y su afección al oleaje, se establece que el efecto del canal en el oleaje depende en primer lugar de la **dirección relativa con la orientación del canal** y en segundo lugar del **periodo del oleaje** (Grey, Cruickshank, Beresford y Tozer, 2010).



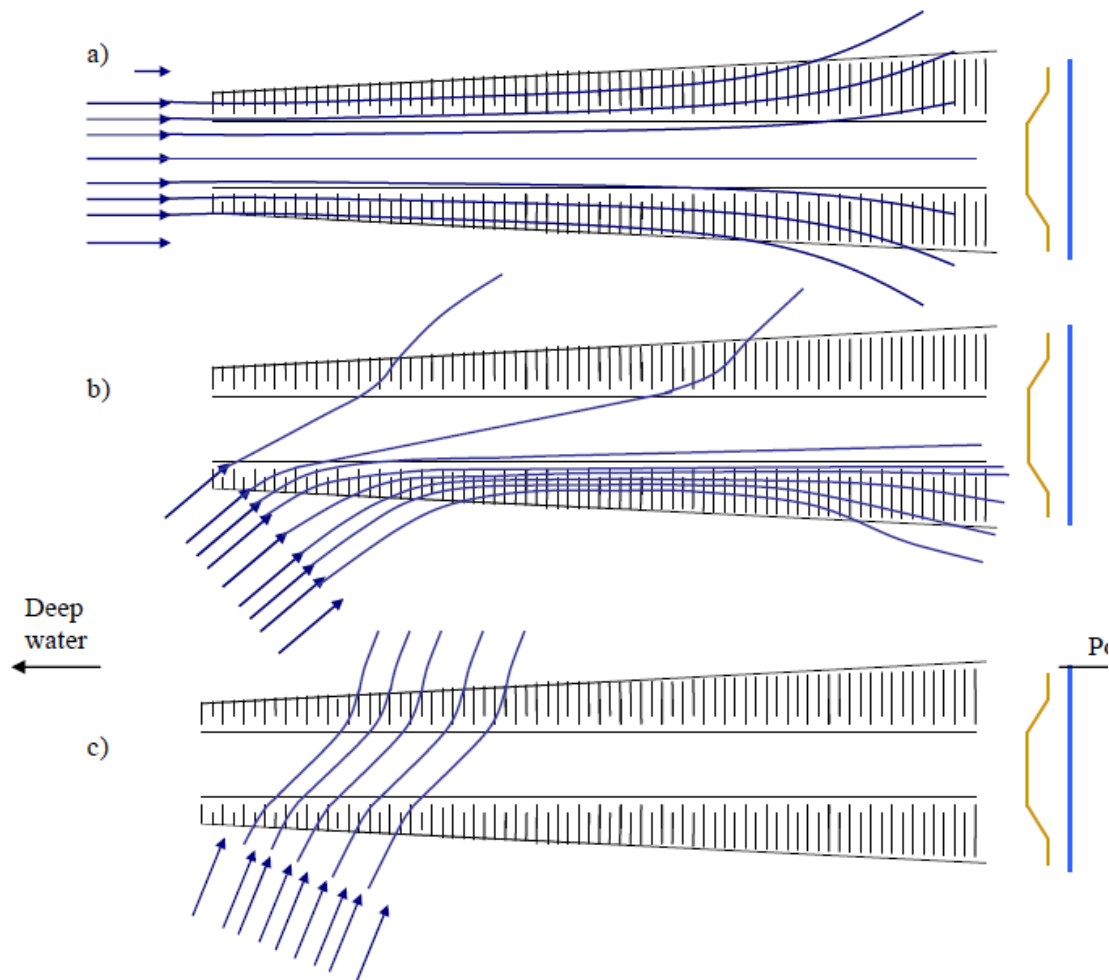
Respecto a la **dirección**, cuando el oleaje se propaga sobre canales dragados, puede agruparse en tres categorías dependiendo de esta **dirección incidente sobre el canal ( $\theta$ )** (Zwamborn and Grieve 1974, Misra et al 2008):

- Si  $\theta \approx 0$ : las ondas se refractan desde el centro del canal, lo que conduce a una concentración de energía de las olas a ambos lados fuera del canal (aumenta la altura de ola) y a una reducida energía del oleaje dentro del canal (disminuye la altura de ola) (ver Figura 8a).
- Si  $\theta \leq \theta_{cr}$ : las ondas se reflejan en la pendiente del canal, lo que conduce a la concentración de la energía de las olas en el lado antes del canal (aumenta la altura de ola) y a una reducida energía del oleaje dentro del canal y al otro lado del canal (disminuye la altura de ola) (ver Figura 8b).
- Si  $\theta > \theta_{cr}$ : las ondas se propagan a través del canal (ver Figura 8c).

Una consecuencia de esto es que un puerto en el extremo de un canal de navegación puede experimentar la menor perturbación producida por el oleaje cuando la dirección de las olas está directamente a lo largo de la alineación del canal (Zwamborn y Grieve 1974, Sarker et al 2008). Cuando la dirección de la ola está en el ángulo crítico, las olas se dirigirán a lo largo del borde del canal y pueden conducir a una mayor actividad del oleaje en el puerto (Grey et al., 2010).

Por otro lado, respecto al **periodo del oleaje** (T), cortos periodos del oleaje son menos afectados por la refracción que largos periodos de oleaje, y el ángulo crítico es también más pequeño. Además, si el período de onda es largo y, por lo tanto, la longitud de onda es significativamente mayor que el ancho del canal, las ondas no notarán el canal y se propagarán directamente a través del canal, donde periodos de onda más cortos se reflejarán.

Figura 8. Olas propagándose en 3 direcciones diferentes por el canal de navegación: a) Longitudinalmente, b) bajo el ángulo crítico y c) bajo un ángulo mayor que el crítico.



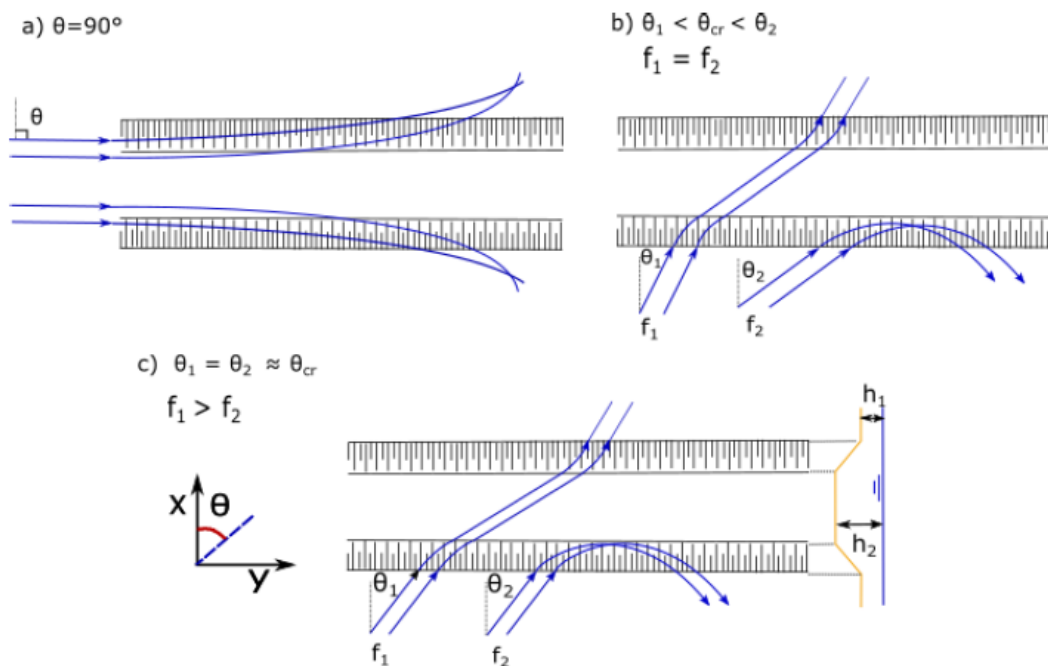
Fuente: (Guzman Mardones, 2011).

En la Figura 8 (Guzman Mardones, 2011) se pueden observar estos tres casos:

- En el caso a) las olas se acercan y viajan paralelas al canal y a medida que interactúan con las pendientes del canal se refractan fuera del canal y se difractan debido a la diferencia de celeridad fuera del canal de aproximación. Esto provoca que la altura de ola se reduzca dentro del canal y por tanto también la energía que entra al puerto. Esto se conoce como desenfoque, divergencia o reducción de onda. Las ondas que salen del canal interactúan con las ondas entrantes no perturbadas, lo que conduce a un aumento local de la altura de las ondas justo fuera del canal. Este fenómeno se conoce como concentración de ondas, enfoque de ondas o amplificación de ondas.
- En el caso b) las olas se acercan a un ángulo que las "atrae" contra la pendiente del canal. Las olas se refractan lo suficiente para permanecer en la pendiente del canal, lo que provoca un aumento de la altura de las olas, generando así gradientes positivos en la altura de las olas. Sin embargo, de acuerdo con la teoría de ondas lineales, las ondas no pueden propagarse sobre la pendiente sin cambiar su dirección. Por lo tanto, después de quedar atrapados, se refractan fuera del canal. Este efecto se asemeja a la reflexión

- de las ondas, ya que las ondas que alcanzan la pendiente se ven reflejadas " y luego se refractan fuera del canal, como en el caso b) de la Figura 8 b).
- Finalmente, en el caso c) de que las olas cruzan el canal sin grandes interrupciones, modificando levemente su dirección de propagación primero hacia la zona poco profunda y después hacia la zona más profunda. Esto se debe a que el ancho del canal no es suficiente para afectarlos permanentemente.

Figura 9. Refracción del oleaje a través de un canal: a) por oleaje paralelo al eje del canal, b) por oleaje con la misma frecuencia pero diferentes ángulos de aproximación que el crítico, c) por oleaje con ángulo de aproximación igual que el crítico pero diferentes frecuencias.



Fuente: (Dusseljee et al., 2012), (Zwamborn and Grieve, 1974), (Monteban, 2016).

Por otro lado, la Figura 9 b) muestra el efecto de las ondas entrantes con la misma frecuencia y diferentes ángulos y la Figura 9 c) ilustra el efecto de las ondas entrantes con diferentes frecuencias (períodos de onda) y, en consecuencia, diferentes celeridades de fase, con un ángulo de aproximación cercano al ángulo crítico. En este último caso, las ondas de baja frecuencia tienen un ángulo crítico más bajo, por lo que es más probable que se reflejen. Esto se debe a que para las ondas de alta frecuencia, el valor de  $kh$  se vuelve grande y  $\tanh(kh)$  se aproxima a uno, lo que resulta en una menor dependencia de la profundidad. Por lo tanto, las ondas de alta frecuencia se ven menos afectadas por la caída repentina de la profundidad y tienen un ángulo crítico más alto en consecuencia.

### 1.3. La influencia de los canales de navegación en la ingeniería de costas y puertos.

Debido a la importancia de los procesos de transformación del oleaje por cambios abruptos de la batimetría, es necesario identificar los ámbitos de la ingeniería de costas y puertos que pueden verse afectados por los canales de navegación: el diseño funcional, estructural y en planta de un puerto y el equilibrio a largo plazo de playas adyacentes al canal.

#### 1. Afección al diseño funcional de las estructuras de abrigo de un puerto

La acción del oleaje sobre los morros de los diques es diferente que sobre el talud del tronco de un dique, debido a que el oleaje ataca los diferentes sectores del morro con ángulos de incidencia diferentes. Además, la difracción y refracción sobre el morro provocan la concentración del oleaje en el morro y la rotura sobre el mismo en voluta. Por este motivo, cualquier mínimo cambio en el oleaje incidente en el morro debido a la influencia del canal de navegación, puede llegar a afectar especialmente la estabilidad de las piezas en esta zona.

Cuando un tren regular de ondas alcanza el talud indefinido de un dique impermeable, las ondas se deforman, rompen, ascienden y descienden sobre el talud y finalmente se reflejan. De esta forma, las variables relacionadas con el diseño funcional de estructuras son:

- Remonte (wave run-up): ascenso  $R_u$  y descenso  $R_d$ .
- Reflexión.
- Transmisión.
- Rebase (wave overtopping).

#### **Remonte (ascenso-descenso)**

El remonte, también conocido como run-up, es el ascenso-descenso del oleaje sobre las estructuras de abrigo de un puerto. Los factores que influyen en el remonte son:

1. Altura de ola: A igual periodo  $T$ , cuanto mayor sea la altura de ola  $H$ , mayor es el run-up.
2. Peralte de la ola ( $H/L$ ): A igual altura de ola, si modifico el periodo del oleaje  $T$ , modifico el peralte. A mayor peralte, menor número de Iribarren  $I_r$  y menor run-up (cuanto menor  $I_r$ , mayor disipación de energía por rotura y menor run-up sobre el dique). Esto quiere decir, que al modificar el peralte, cambia el tipo de rotura del oleaje sobre mi dique.
3. Interacción con la ola precedente: Cuando la ola precedente es muy grande, ésta ocupa los huecos del talud permeable y la siguiente ola se encuentra con el dique inundado, de forma que pasará por encima y se produce más run-up.
4. Ángulo de incidencia del oleaje: Si el ángulo de incidencia es normal, se produce más run-up porque la ola se refleja.
5. Rugosidad del talud: A mayor rugosidad, menor run-up.
6. Permeabilidad y porosidad del lecho: El run-up es mayor en talud impermeable.

Tabla 1. Tipos de rotura

Tipo de rotura	Nº de Iribarren, $I_{r0}$
Descrestamiento	< 0.4
Voluta	0.4 – 2
Voluta o colapso	2 – 2.6
Colapso u oscilación	2.6 – 3.1
Oscilación	> 3.1

Fuente: Google

## Reflexión

Las olas reflejadas por una estructura incrementan la energía del oleaje frente a la misma, lo que puede generar problemas funcionales. Además, la reflexión sobre la estructura incrementa el flujo sobre la misma, lo que puede obligar a incrementar la cota de coronación. Por ello, suele ser recomendable que las estructuras marítimas tengan coeficientes de reflexión lo más reducidos posible.

Para un tren regular de ondas incidiendo sobre una estructura, el grado de reflexión de una estructura se cuantifica mediante el coeficiente de reflexión, el cual representa el cociente entre la altura de ola reflejada y la altura de ola incidente, en la hipótesis lineal de que un tren regular de ondas se refleja parcialmente sin cambio de frecuencia:

$$\text{Coeficiente adimensional: } C_R = H_{m0r}/H_{m0i} = K_R$$

El coeficiente de reflexión según Goda (1985) depende del tipo de estructura (dique vertical no rebasable, rebasable, dique en talud de escollera o de bloques)

## Transmisión

La transmisión del oleaje se expresa normalmente a través del coeficiente de transmisión,  $C_T$ .

$$\text{Coeficiente adimensional: } C_T = H_{m0t}/H_{m0i} = T$$

La transmisión del oleaje hacia la zona abrigada de la estructura costera puede producirse por tres mecanismos: 1) rebase sobre la coronación, 2) transmisión a través del macizo rocoso (cuando es permeable al oleaje) y 3) transmisión por difracción por los extremos de la estructura.

## Rebase

El rebase ( $q$ ) se define como el caudal medio por unidad de longitud que supera la coronación ( $m^3/s/m$ ), es decir, el transporte de una cantidad importante de agua sobre la coronación de la estructura.

Para que se produzca el rebase por la coronación de un dique, es necesario que la elevación de la coronación sobre el nivel medio o francobordo  $F$ , sea inferior al máximo ascenso del oleaje, luego un buen criterio sobre la rebasabilidad de un dique ante un estado de mar vendrá dado por la estadística de los ascensos de dicho estado de mar que superan el francobordo.

El agua que rebasa un dique puede provocar problemas como daño físico a personas que visiten o trabajen en la zona abrigada, daño por sobrecarga, inundación o arrastre de edificios, vehículos, barcos, equipos e instalaciones situados en la zona abrigada, daño económico por afección a la operatividad de las instalaciones abrigadas, averías en las superestructuras o estructuras de la coronación y zona inferior del dique o puede provocar transmisiones de oleaje indeseadas.

Por tanto, el remonte se necesita para caracterizar la cota superior del dique y el rebase para determinar su funcionalidad. Puesto que el rebase depende de la altura de ola que llega al pie de la estructura, y la coronación del dique se diseña en función de un estudio estadístico de dicha altura de ola, si esta altura de ola se ve modificada por el canal de navegación, lo más probable es que la cota de coronación no esté bien calculada y la estructura de protección quedaría mal diseñada.

## **2. Afección al diseño estructural de la estructura de abrigo de un puerto**

Otro aspecto que puede verse afectado por el canal de navegación, es el diseño estructural de un dique. Al igual que el anterior efecto, en la zona de los morros de las estructuras de abrigo, el peso de las piezas depende de la altura de ola a pie de dique. Como el peso del hormigón que voy a emplear es directamente proporcional a la energía del oleaje que le va a llegar, si dicha energía de oleaje a pie de dique se ve afectada por la existencia del canal, cambiaría la sollicitación a la que se encuentra sometida el dique y sería necesario recalcular el peso de las piezas de la estructura de abrigo, ya que cambiará la cantidad de hormigón que se requiere.

Determinación del peso de las piezas del manto principal, formulación de Losada y Giménez-Curto (1979):

$$W_{50} \text{ (peso de las piezas)} = \Psi * \rho_w * R * H_{50}^3$$

Donde:  $\Psi$  = función de estabilidad (depende de la pendiente del talud, nivel de avería y tipo y forma de colocación de las piezas)

$$\rho_w = \text{densidad del agua de mar} = 1025 \text{ kg/m}^3$$

$$R = Sr / (Sr - 1)^3, \text{ donde } Sr = \rho_s / \rho_w, \text{ siendo } \rho_s = \text{densidad del material}$$

$$H_{50} = \text{altura de ola (m)}$$

## **3. Afección al diseño en planta del puerto (agitación, penetración, respuesta energética del puerto)**

Debido a los procesos de propagación, la energía del oleaje que llega por la bocana al puerto rebotará y se verá reflejada dentro del puerto. De esta forma, esta energía del oleaje producirá agitación en el puerto.

Tal como se ha descrito en apartados anteriores, el oleaje que se propaga sobre canales dragados puede agruparse en tres categorías dependiendo del ángulo de incidencia sobre dicho canal ( $\theta$ ). Un puerto en el extremo de un canal puede experimentar una menor perturbación cuando la dirección del oleaje va a lo largo de la alineación del canal (Zwamborn y Grieve 1974). Cuando la dirección del oleaje está en el ángulo crítico, las olas se dirigirán a lo largo del borde del canal y pueden conducir a una mayor actividad del oleaje en el puerto (Grey et al., 2010).



Es por esto que, dependiendo de este ángulo, la orientación del canal puede ser beneficiosa o perjudicial según sea el diseño en planta del puerto.

#### **4. Afección al equilibrio a largo plazo de playas adyacentes al canal**

Las playas sufren cambios topobatimétricos bajo la acción de las principales dinámicas que actúan sobre ellas: oleaje, corrientes y vientos. Al igual que un aumento de la energía que llega al puerto puede provocar una mayor agitación en el puerto, ocurre lo mismo en el caso de las posibles playas adyacentes a dichos puertos.

La zona de rompientes de las playas se encuentra siempre en constante cambio, modificándose en el tiempo y en el espacio debido a las condiciones siempre variables del oleaje. Estas variaciones temporales y espaciales involucran cambios en la morfología y en la dinámica de la playa.

En este caso, puesto que el oleaje es la fuente principal de energía que moviliza los cambios en la playa, un cambio en la energía del oleaje a causa de la incorporación de un canal de navegación, cambiará la playa.

Por todas estas razones, y puesto que todo el diseño del puerto se hace previamente, sin tener en cuenta el canal de navegación, es de suma importancia considerar una revisión de todo el proyecto para la situación con canal, ya que seguramente afectará al diseño portuario.

## **2. OBJETIVOS**

El presente Trabajo Fin de Máster tiene como objetivo general evaluar numéricamente el efecto de los canales de navegación en el oleaje que incide en las zonas costeras, y en particular en puertos, de forma que se demuestre su importancia de cara al diseño de estructuras portuarias.

Como objetivo secundario, se desea realizar un análisis comparativo entre dos modelos numéricos de propagación de oleaje distintos pero de uso general en la técnica, con la idea de cuantificar sus capacidades para reproducir los efectos de propagación de oleaje sobre los canales de navegación.

Finalmente, el tercer y último objetivo consiste en comparar, para una serie de escenarios, distintos valores asociados al diseño de estructuras de abrigo portuarias que se encuentran bajo la influencia de canales de navegación.

## **3. METODOLOGÍA**

### **3.1. Introducción**

Para poder verificar que los modelos numéricos reproducen la física de la interacción del oleaje con los canales de navegación, por un lado se establecerá un modelo teórico de un canal de navegación y por otro, utilizando los modelos numéricos de propagación de oleaje SWAN y MSP, se someterá a un experimento controlado de comparación. En apartados posteriores se realizará una descripción detallada de estos modelos numéricos (SWAN y MSP).

### **3.2. Descripción del montaje de los experimentos**

El primer paso del presente estudio, es diseñar un laboratorio numérico de control para poder caracterizar los procesos de propagación del oleaje bajo la influencia de canales dragados mencionados en apartados anteriores. El diseño de este laboratorio obedecerá unas dimensiones de carácter realista tomadas como recomendación de los documentos del PIANC y la ROM. De esta forma, con las dos herramientas de las que se dispone (el modelo SWAN y el modelo MSP), se podrá comprobar si los resultados representan la física que la teoría recoge.

Por otro lado, se propondrán una serie de forzamientos (que constituirán una serie de escenarios) que sean coherentes con los procesos de propagación del oleaje que se quieren observar, es decir, buscando coherencia física y realismo a escala climática en el prototipo. De esta forma, por ejemplo, se propondrán unos ángulos de propagación del oleaje óptimos que fomentarán la presencia de las distintas formas de interacción discutidas en el capítulo anterior.

### **3.3. Resultados**

En primer lugar, se ejecutan los escenarios relativos a los forzamientos con cada modelo (con el modelo SWAN y MSP), intentando que el montaje numérico de dichos casos sea análogo.

En segundo lugar, se comprueban los resultados obtenidos con cada modelo y se redactan conclusiones. Se analizarán por separado, tanto para el modelo SWAN como para el modelo MSP, los distintos escenarios en la situación sin canal, haciendo comparaciones entre dichos escenarios, y se presenta una discusión respecto a los procesos de propagación del oleaje que están mejor representados en cada modelo. A continuación, se lleva a cabo el mismo procedimiento para la situación con canal para ambos modelos por separado. Para terminar, se ejecuta un análisis comparativo entre dichos modelos de la situación con canal, concluyendo cuál puede ser el modelo que represente mejor los escenarios planteados.

Finalmente, en tercer lugar, se explotan las herramientas para la cuantificación de un diseño de un puerto real, mediante la obtención del clima marítimo a pie de dique en las situaciones con y sin canal con ambos modelos, de tal forma que se pueda realizar una comparación de los resultados obtenidos.

## **4. FASE A: EXPERIMENTO TEÓRICO**

La fase A consiste en el planteamiento de un experimento teórico controlado para 4 escenarios posibles (casos con y sin canal en ambos modelos SWAN y MSP), de forma que se puedan estudiar los efectos del canal.

#### 4.1. Geometría del experimento

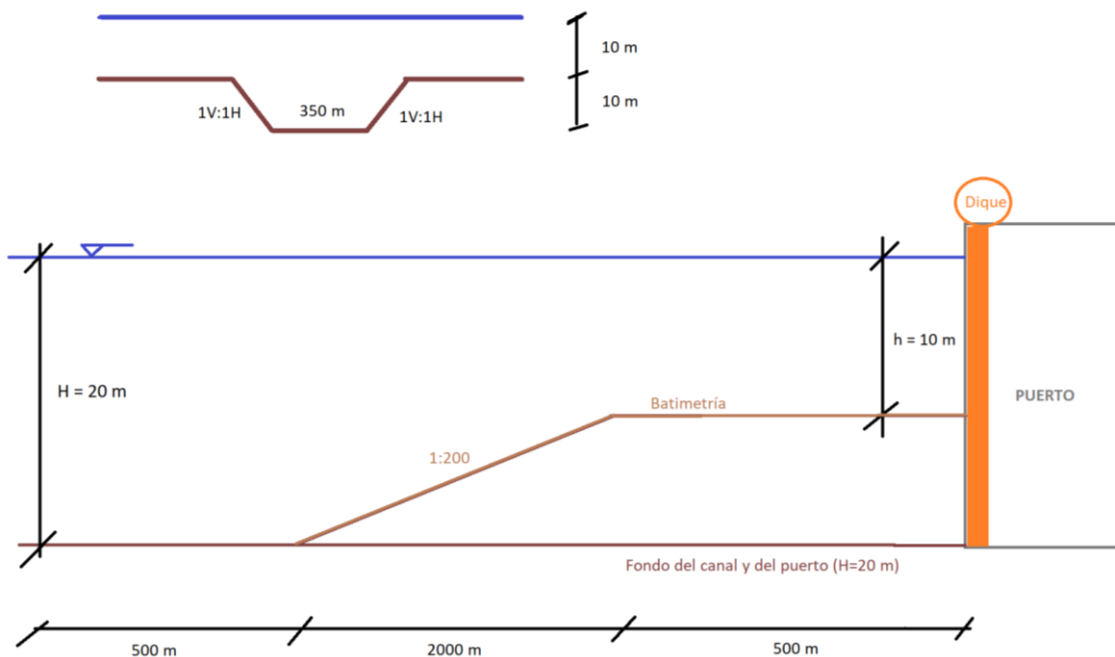
Para poder llevar a cabo el experimento teórico, se propone un canal con las siguientes dimensiones:

Tabla 2. Dimensiones del Canal de Navegación

DIMENSIONES	
Anchura en el fondo del canal (B)	350 m
Longitud del canal (L)	2000 m
Profundidad del canal (H)	20 m
Talud (Pendientes laterales del canal)	1V:1H
Pendiente batimetría	1:200
Profundidad mínima en el dominio (h)	10 m

Fuente: Elaboración propia

Figura 10. Representación conceptual del canal de navegación considerado en el estudio



Fuente: Elaboración propia

La geometría de canal considerada en este estudio es trapezoidal.

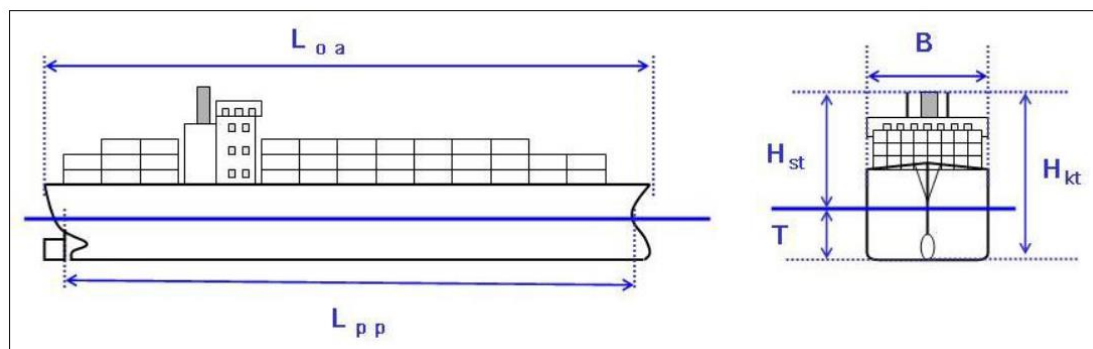
Según el PIANC (2014), la ROM 3.1 y otros experimentos observados desarrollados por otros autores: Misra et al. (2008), Zwamborn y Grieve (1974), Guzman Mardones (2011), estas dimensiones se consideran representativas de un canal de navegación que permitiría el tráfico en dos carriles para los buques portacontenedores post-panamax, que son buques encargados de transportar carga en contenedores estandarizados. Se considera este tipo de barco para el diseño del canal puesto que son los más extendidos a nivel mundial, se estima que más del 50% de todo el comercio marítimo internacional se realiza a través de estos buques (Transeop, 2019).

Figura 11. Post-Panamax



Fuente: Google

Figura 12. Dimensiones típicas de un barco



Fuente: PIANC (2014)

Según el PIANC (2014), los parámetros que definen las dimensiones típicas de un barco, como se muestra en la Figura 12 son:

$L_{oa}$  = Largo total

$L_{pp}$  = Longitud entre perpendiculares

$B$  = Anchura

$T$  = Calado máximo de navegación. Se basa en el calado máximo para buques totalmente cargados.

$H_{kt}$  = Altura desde el fondo hasta la parte superior del buque

$H_{st}$  = Altura desde la superficie del mar o del agua hasta la parte superior del buque

Tabla 3. Dimensiones típicas de los portacontenedores (Post-Panamax)

DWT (tonnes)	$\Delta$ (t)	$L_{oa}$ (m)	$L_{pp}$ (m)	$B$ (m)	$T$ (m)	$C_B$ (-)	Min. Lateral Windage: Fully Loaded (m <sup>2</sup> )	Max. Lateral Windage: In Ballast (m <sup>2</sup> )	Approx. Capacity: TEU / CEU
Container Ships (Post-Panamax)									TEU
245,000	340,000	470.0	446.0	60.0	18.0	0.69	11,000	12,500	22,000
200,000	260,000	400.0	385.0	59.0	16.5	0.68	10,700	12,000	18,000
195,000	250,000	418.0	395.0	56.4	16.0	0.68	10,100	11,300	14,500
165,000	215,000	398.0	376.0	56.4	15.0	0.66	9,500	10,500	12,200
125,000	174,000	370.0	351.0	45.8	15.0	0.70	8,700	9,500	10,000
120,000	158,000	352.0	335.0	45.6	14.8	0.68	8,000	8,700	9,000
110,000	145,000	340.0	323.0	43.2	14.5	0.70	7,200	7,800	8,000
100,000	140,000	326.0	310.0	42.8	14.5	0.71	6,900	7,500	7,500
90,000	126,000	313.0	298.0	42.8	14.5	0.66	6,500	7,000	7,000
80,000	112,000	300.0	284.0	40.3	14.5	0.66	6,100	6,500	6,500
70,000	100,000	280.0	266.0	41.8	13.8	0.64	5,800	6,100	6,000
65,000	92,000	274.0	260.0	41.2	13.5	0.62	5,500	5,800	5,600
60,000	84,000	268.0	255.0	39.8	13.2	0.61	5,400	5,700	5,200
55,000	76,500	261.0	248.0	38.3	12.8	0.61	5,200	5,500	4,800

Fuente: ROM 3.1-99

### CRITERIOS DE VALORACIÓN DE DIMENSIONES GEOMÉTRICAS

Según la ROM 3.1-99, la **definición geométrica de las Áreas de Navegación y Flotación** está basada en el conocimiento de los espacios ocupados por los buques. Para que la navegación se efectúe en condiciones de seguridad, se precisa disponer de unos espacios adicionales (Márgenes o Resguardos de Seguridad) entre los requeridos por los buques y los disponibles según las condiciones de contorno del emplazamiento.

La relación de verificación de los requisitos de seguridad para las dimensiones de un Área de Navegación o Flotación, vendrá por tanto expresada así:

$$X_e = X_b + X_s$$

$X_e$  = Espacio disponible en el emplazamiento

$X_b$  = Espacio ocupado por el buque

$X_s$  = Resguardo de Seguridad

### DETERMINACIÓN DE PROFUNDIDADES DE AGUA DE LAS ÁREAS DE NAVEGACIÓN Y FLOTACIÓN

La determinación de la profundidad de agua necesaria en las diferentes Áreas de Navegación y Flotación se realizará tomando en consideración los factores siguientes:

- El **primer bloque de factores ( $H_1$ )**, integra todos aquellos que dependen del buque, ya sea en condiciones estáticas o dinámicas, incluso aunque el movimiento esté originado por causas externas al propio buque (vientos, oleajes, corrientes, etc.); representa por tanto el nivel más bajo que puede alcanzar cualquier punto del buque, en relación con el nivel medio de las aguas en las que se encuentra. Se integra en este grupo el resguardo para seguridad y control de la maniobrabilidad del barco y los propios Márgenes de Seguridad del dimensionamiento, si bien se trata de espacios que en condiciones normales nunca serán alcanzados por el casco del buque.
- El **segundo bloque de factores ( $H_2$ )**, recoge el análisis de las mareas y otras variaciones del nivel medio de las aguas (mareas astronómicas y meteorológicas, variaciones de

caudal de ríos, bombeo en dársenas esclusadas, etc.), es decir, factores que determinan el nivel medio de referencia de las aguas en las que se encuentra el buque y que no generan movimientos verticales diferenciales significativos entre diferentes puntos del casco del buque.

- El **tercer bloque de factores ( $H_3$ )** recoge exclusivamente los que dependen del fondo, incluyendo imprecisiones de la batimetría, depósito de sedimentos y tolerancias de ejecución del dragado.

Los tres bloques citados anteriormente no siempre necesitan ser objeto de análisis detallado.

El estudio de los factores relacionados con el nivel de las aguas ( $H_2$ ) se omite cuando la determinación de calados se efectúa a partir del nivel más bajo que puedan alcanzar las aguas. Esto equivale a suponer que los buques pueden operar en cualquier condición de nivel de agua existente. Este supuesto es habitual en los casos en los que existen carreras de marea u otras variaciones del nivel de las aguas reducidas, que es lo que se considera en este caso.

El bloque de factores relacionados con el fondo ( $H_3$ ) normalmente sólo se considera cuando se trata de realizar proyectos de dragado pero no cuando se trata de evaluar la navegación de un buque por zonas de calados controlados, en los que habitualmente se parte de un nivel conocido del fondo en el que deben estar ya deducidos los factores relacionados con el fondo, como se considera en este estudio.

Finalmente, el bloque de factores relacionados con el buque ( $H_1$ ) normalmente debe analizarse en todos los casos, por lo que se estudia a continuación el valor del resguardo para seguridad y control de la maniobrabilidad del barco y los propios Márgenes de Seguridad del dimensionamiento.

### **Resguardos para seguridad y control de maniobrabilidad del buque**

Los resguardos de seguridad que se deben tener en cuenta para la determinación de la profundidad de agua necesaria en las diferentes áreas de Navegación y Flotación son el margen de seguridad ( $rv_{sd}$ ) y el resguardo para seguridad y control de la maniobrabilidad del buque ( $rv_{sm}$ ).

El margen de seguridad ( $rv_{sd}$ ) es el resguardo vertical libre que deberá quedar siempre disponible entre el casco del buque y el fondo y el resguardo para seguridad y control de la maniobrabilidad del buque ( $rv_{sm}$ ) es el espesor mínimo de la lámina de agua que debe quedar bajo la quilla para que el barco pueda mantener el control de la navegación.

Para la determinación de estos valores se utiliza la tabla mostrada a continuación. En ningún caso podrán aceptarse valores de « $rv_{sm} + rv_{sd}$ » inferiores a los que se indica en dicha tabla, medidos en la crujía del buque.



Tabla 4. Resguardos para seguridad y control de la maniobrabilidad del buque ( $rv_{sm}$ ) y margen de seguridad ( $rv_{sd}$ )

	$rv_{sm}$	$rv_{sd}$	$rv_{sm} + rv_{sd}$
1. Buques de gran desplazamiento ( $> 30.000$ t)			
— Navegación sobre fondos limosos o arenosos			
• Velocidad del buque no limitada ( $> 8$ nudos)	0,60 m	0,30 m	0,90 m
• Velocidad del buque limitada ( $\leq 8$ nudos)	0,30 m	0,30 m	0,60 m
• Buque parado (muelles, atraques, etc.)	0,00 m	0,30 m	0,30 m
— Navegación sobre fondos rocosos			
• Velocidad del buque no limitada ( $> 8$ nudos)	0,60 m	0,60 m	1,20 m
• Velocidad del buque limitada ( $\leq 8$ nudos)	0,30 m	0,60 m	0,90 m
• Buque parado (muelles, atraques, etc.)	0,00 m	0,60 m	0,60 m
2. Buques de mediano y pequeño desplazamiento ( $\leq 10.000$ t, excepto embarcaciones menores, deportivas y pesqueros)			
— Navegación sobre fondos limosos o arenosos			
• Velocidad del buque no limitada ( $> 8$ nudos)	0,30 m	0,30 m	0,60 m
• Velocidad del buque limitada ( $\leq 8$ nudos)	0,20 m	0,30 m	0,50 m
• Buque parado (muelles, atraques, etc.)	0,00 m	0,30 m	0,30 m
— Navegación sobre fondos rocosos			
• Velocidad del buque no limitada ( $> 8$ nudos)	0,30 m	0,60 m	0,90 m
• Velocidad del buque limitada ( $\leq 8$ nudos)	0,20 m	0,60 m	0,80 m
• Buque parado (muelles, atraques, etc.)	0,00 m	0,60 m	0,60 m
3. Buques de desplazamientos comprendidos entre 10.000 y 30.000 t.			
— Interpolar linealmente en función del desplazamiento indicado en los apartados 1 y 2			
4. Embarcaciones menores, deportivas y pesqueros			
— Navegación sobre fondos limosos o arenosos			
• Velocidad del buque no limitada ( $> 8$ nudos)	0,20 m	0,20 m	0,40 m
• Velocidad del buque limitada ( $\leq 8$ nudos)	0,10 m	0,20 m	0,30 m
• Buque parado (muelles, atraques, etc.)	0,00 m	0,20 m	0,20 m
— Navegación sobre fondos rocosos			
• Velocidad del buque no limitada ( $> 8$ nudos)	0,20 m	0,40 m	0,60 m
• Velocidad del buque limitada ( $\leq 8$ nudos)	0,10 m	0,40 m	0,50 m
• Buque parado (muelles, atraques, etc.)	0,00 m	0,40 m	0,40 m

Fuente: ROM 3.1.-99

Teniendo en cuenta que se supone la utilización de buques portacontenedores post-panamax, que son buques de gran desplazamiento ( $> 30.000$  t), y suponiendo por seguridad el peor de los casos (navegación sobre fondos rocosos y velocidad del buque no limitada ( $> 8$  nudos)), el resguardo y margen de seguridad que debe quedar bajo la quilla para garantizar una navegación segura sería de 1,20 m ( $rv_{sm} + rv_{sd} = 1,20$  m).

Para terminar, siguiendo la relación de verificación de los requisitos de seguridad para las dimensiones de un Área de Navegación o Flotación:  $X_e$  (emplazamiento) =  $X_b$  (buque) +  $X_s$  (resguardo) y considerando según la Tabla 3 el mayor post-panamax, cuyo calado máximo es  $T=18$  m, el fondo del canal debería situarse a una profundidad  $H$ :

$$H = T + rv_{sm} + rv_{sd} = 18 \text{ m} + 1,2 \text{ m} = 19,2 \text{ metros, es decir, } H = 20 \text{ metros.}$$

### **DETERMINACIÓN DE LA CONFIGURACIÓN Y DIMENSIONES EN PLANTA DE LAS ÁREAS DE NAVEGACIÓN Y FLOTACIÓN**

La determinación de la configuración y dimensiones en planta necesarias en las diferentes áreas de Navegación y Flotación se realizará en cada caso tomando en consideración los factores siguientes:

- El primer bloque de factores ( $B_1$ ) integra el tamaño, dimensiones y características de maniobrabilidad de los buques y los factores relacionados con los barcos, incluida la disponibilidad de remolcadores, de los que depende la superficie necesaria para la realización de la navegación, maniobras o permanencia de los buques en el área que se considere. Además incluye la valoración de los márgenes de seguridad que se establezcan para prevenir un contacto del buque con los contornos de las áreas de navegación o flotación, o con otras embarcaciones u objetos fijos o flotantes que puedan existir en el entorno.
- El segundo bloque de factores ( $B_2$ ) incluye las ayudas a la navegación disponibles y los factores que afectan a su exactitud y fiabilidad, que determinarán las líneas o puntos de referencia para emplazar el buque.

La consideración de los factores anteriores cuantificará la superficie y dimensiones mínimas requeridas en planta, o dimensiones nominales. Estas superficies horizontales, para poder quedar garantizadas como espacios disponibles en el emplazamiento:  $X_e$  (emplazamiento) =  $X_b$  (buque) +  $X_s$  (resguardo), exigirán tomar además en consideración un tercer conjunto de factores relacionados con los contornos ( $B_3$ ).

### **ANCHURA DE LAS VÍAS DE NAVEGACIÓN**

La anchura de la vía de navegación para un solo barco, medida perpendicularmente al eje longitudinal de la vía, se determinará como suma de los términos siguientes:

$$B_t = B_n + B_r$$

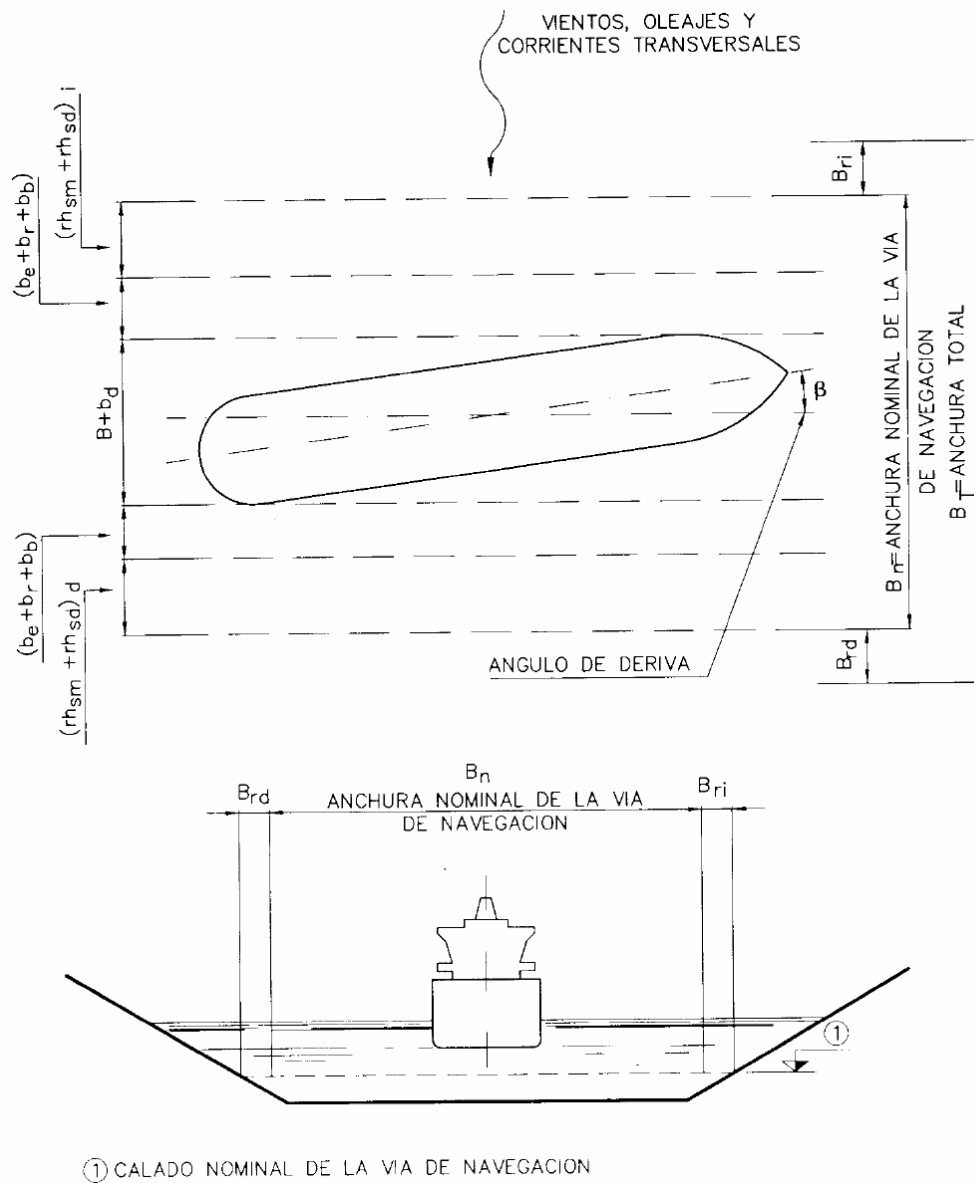
$B_t$  = Anchura total de la vía de navegación.

$B_n$  = Anchura nominal de la vía de navegación o espacio libre que debe quedar permanentemente disponible para la navegación de los buques, incluyendo los Márgenes de Seguridad. Esta anchura nominal incluye por tanto la influencia de todos los factores designados como  $B_1$  y  $B_2$ .

$B_r$  = Anchura adicional de reserva para tomar en consideración los factores relacionados con los contornos ( $B_3$ ). Esta anchura podrá ser diferente a una y otra margen «Bri» o «Brd» según la naturaleza y características de las mismas.

Al igual que en el caso de la profundidad no se tenían en cuenta los factores relacionados con el fondo, tampoco se va a tener en cuenta los factores relacionados con los contornos, luego la anchura total de navegación se considerará aproximadamente igual a la anchura nominal ( $B_t = B_n$ ).

Figura 13. Anchura de las vías de tramo recto con un solo carril de navegación



Fuente: ROM 3.1.-99

La anchura nominal mínima de una vía de navegación de tramo recto, dotada de un solo carril, en el supuesto de que las condiciones climáticas marítimas y meteorológicas (vientos, oleajes y corrientes) sean constantes a lo largo de la traza, se determinará como suma de las dimensiones siguientes:

$$B_n = B + b_d + 2(b_e + b_r + b_b) + (rh_{sm} + rh_{sd})_{izda} + (rh_{sm} + rh_{sd})_{dcha}$$

$B$  = Manga máxima de los buques que circularán por la vía de navegación.

Según la Tabla 3, si se considera el mayor post-panamax, la manga máxima es  $B = 60$  m.

$b_d$  = Sobreebanco de la senda del buque, producido por la navegación con un determinado ángulo de deriva en relación con el eje de la vía navegable, para corregir la deriva del buque ocasionada por la incidencia de los vientos, oleajes, corrientes o remolcadores. Se calculará con la fórmula siguiente:

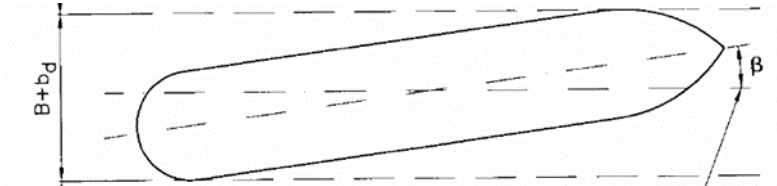
$$b_d = L_{oa} * \sin \beta$$

siendo:

$L_{oa}$  = Eslora total del buque de diseño.

$\beta$  = Angulo de deriva, que puede determinarse con las fórmulas siguientes válidas para valores de  $b \leq 25^\circ$ .

Figura 14. Ángulo de deriva  $\beta$



Fuente: ROM 3.1.-99

El ángulo de deriva máximo que se puede considerar para que el barco navegue adecuadamente, de tal forma que pueda girar un poco pero no pierda el control es  $25^\circ$ .

Por tanto, para calcular el sobreancho por deriva se considera el peor ángulo de deriva ( $25^\circ$ ) y una eslora de longitud  $L_{oa} = 470$  m para el mayor post-panamax según la Tabla 3.

$$b_d = 470 * \sin 25 = 198 \text{ m} \rightarrow 200 \text{ m}$$

$$B + b_d = 60 + 200 = 260 \text{ m}$$

$b_e$  = Sobreancho por errores de posicionamiento. Corresponde a la diferencia entre la verdadera posición del buque y la posición estimada por el capitán utilizando los medios de información y ayuda a la navegación disponibles (GPS) en el área de navegación o flotación que se analice.

$b_r$  = Sobreancho para respuesta, que valora la desviación adicional que puede producirse desde el instante en que se detecta la desviación del buque en relación a su posición teórica y el momento en que la corrección es efectiva.

$b_b$  = Sobreancho para cubrir el error que pudiera derivarse de los propios sistemas de balizamiento.

No se tiene en cuenta ninguno de los sobreanchos ( $b_e$ ,  $b_r$  y  $b_b$ ) porque no interesa para el cálculo del ancho del canal.

$rh_{sm}$  = Resguardo adicional de seguridad que deberá considerarse a cada lado de la vía navegable, para permitir la navegación del buque sin que resulte afectada por los efectos de succión y rechazo de las márgenes.

$rh_{sd}$  = Margen de Seguridad o resguardo horizontal libre que deberá quedar siempre disponible entre el buque y los contornos, taludes o cajeros de la vía navegable.

Los resguardos  $rh_{sm}$  y  $rh_{sd}$  podrán ser diferentes en una y otra margen ( $rh_{izda}$  y  $rh_{dcha}$ ). Para su determinación se tomarán los valores indicados en la Tabla 4, que tiende a minimizar el riesgo de contacto del buque atendiendo a la naturaleza de las márgenes de la vía navegable. En ningún caso podrán aceptarse valores de « $rh_{sm} + rh_{sd}$ » inferiores a los que se indican en dicha figura.

Figura 15. Resguardos  $rh_{sm}$  y  $rh_{sd}$

	$rh_{sm}$	$r_{sm}$	$r_{sm} + rh_{sd}$
— Vías de navegación con taludes tendidos ( $V/H \leq 1/3$ )			
• Velocidad absoluta del buque $\geq 6$ m/s	$0.6 B$	$0.1 B$	$0.7 B$
• Velocidad absoluta del buque entre 4 y 6 m/s	$0.4 B$	$0.1 B$	$0.5 B$
• Velocidad absoluta del buque $\leq 4$ m/s	$0.2 B$	$0.1 B$	$0.3 B$
— Vías de navegación con taludes rígidos ( $V/H \geq 1/2$ ) o con márgenes rocosos o estructurales			
• Velocidad absoluta del buque entre $\geq 6$ m/s	$1.2 B$	$0.2 B$	$1.4 B$
• Velocidad absoluta del buque entre $\leq 4$ y 6 m/s	$0.8 B$	$0.2 B$	$1.0 B$
• Velocidad absoluta del buque $\leq 4$ m/s	$0.4 B$	$0.2 B$	$0.6 B$

Fuente: ROM 3.1.-99

Considerando la peor situación (para vías de navegación con taludes rígidos y velocidad absoluta del buque  $\geq 6$  m/s) se obtiene el siguiente valor de los resguardos:

$$rh_{sm} + rh_{sd} = 1,4B = 1,4 \cdot 60 = 84 \text{ m}$$

Con todos estos factores, la anchura de la vía con un carril de navegación es:

$$B_n = 60 + 200 + 84 = 344 \text{ metros} \rightarrow 350 \text{ metros}$$

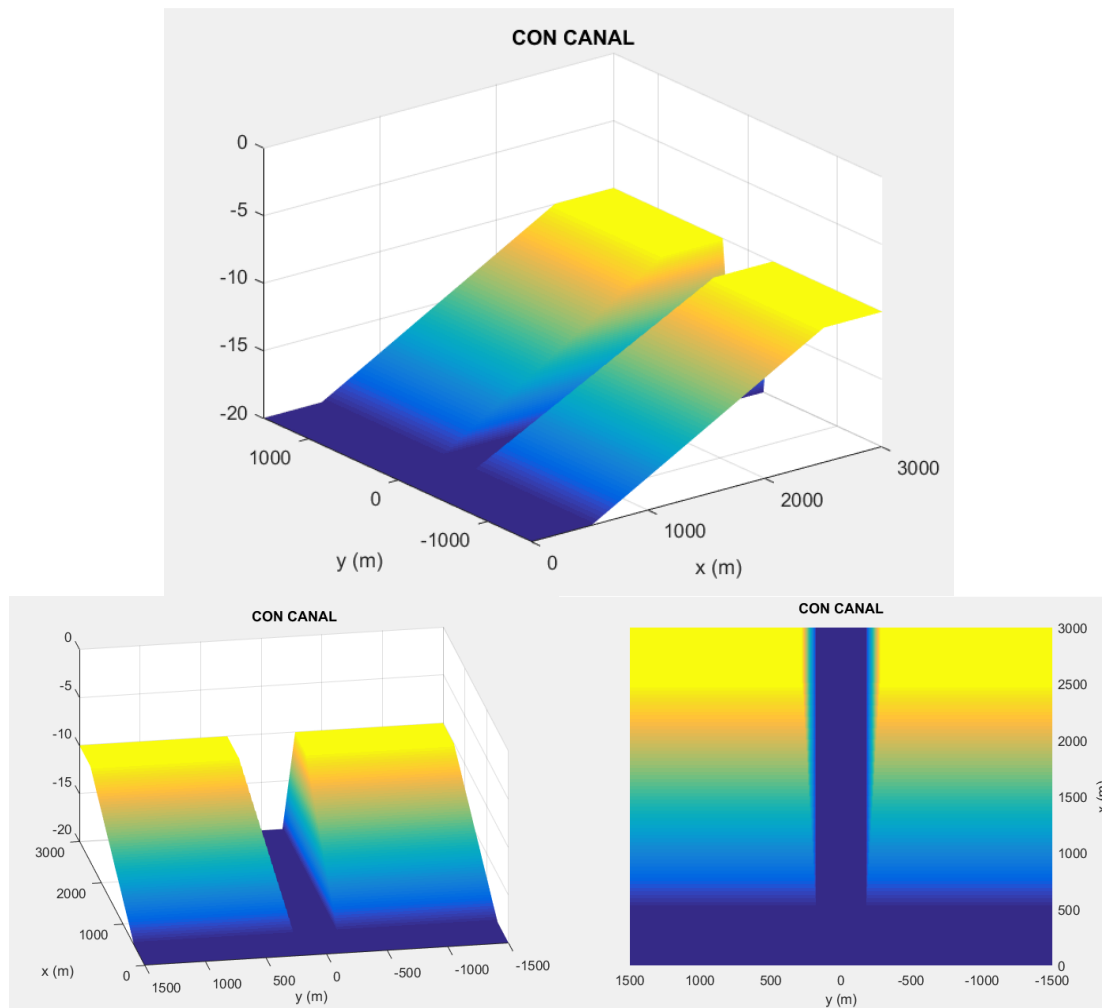
Esta anchura de 350 metros de canal considerada por la ROM para un solo carril de navegación, es aún mayor que la anchura considerada por otros autores (300 m) para incluso dos carriles de navegación. Esto se debe a que para el cálculo realizado en este trabajo se ha considerado el post-panamax más grande, mientras que posiblemente el de estos autores sea más pequeño.

El ancho de los canales de navegación ha sido estudiado antes por Zwamborn y Grieve (1974) y Misra et al. (2008). Ambos estudios concluyeron que una ampliación del ancho del canal provoca más energía y por lo tanto mayor oleaje propagándose a través del canal. Es por este motivo que se dimensiona para el mayor post-panamax, porque interesa que el canal de navegación sea lo más ancho posible para poder caracterizar mejor qué pasa en el propio canal y a ambos lados el canal. Cuanto más ancho tenga el canal, los efectos serán más marcados y se podrán caracterizar de forma aislada.

Respecto a las **laderas de los canales de navegación**, por motivos económicos de proyectos portuarios y de dragado, se están ejecutando cada vez más pronunciadas (Misra et al., 2008). Debido a ello, para que las dimensiones se ajusten a los últimos diseños de canales reales, se plantea que el **talud** de las paredes laterales del canal sea **1V:1H**.

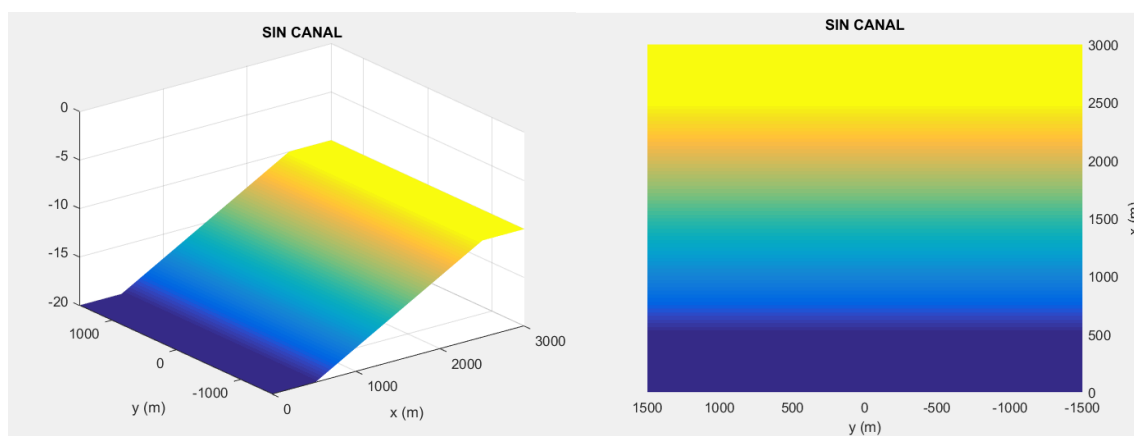
Con todo esto, el experimento después de haberlo programado es el que se muestra en la Figura 16 (en el caso con canal) y en la Figura 17 (en el caso sin canal).

Figura 16. Experimento con canal



Fuente: Elaboración Propia

Figura 17. Experimento sin canal



Fuente: Elaboración Propia

## 4.2. Forzamientos

Se plantean una serie de forzamientos coherentes con los procesos que interesa verificar de la teoría mencionada previamente:

$H_s$  = Altura de ola significativa (m)

$T_p$  = Periodo pico (s)

$\theta$  = dirección del oleaje (°)

$\gamma$  = grado de apuntamiento del espectro ( $\gamma=5$ )

$\delta$  = anchura o dispersión direccional ( $\delta=\pm 10^\circ$ )

Tal como se vio en apartados anteriores, el efecto del canal en el oleaje depende de la dirección relativa con la orientación del canal ( $\theta$ ) y del periodo del oleaje ( $T_p$ ) (Grey et al., 2010). Por este motivo, los forzamientos que se plantean estudiarán diferentes casos constituidos por periodos y ángulos de incidencia diferentes, para así poder realizar un estudio de cada caso y comprobar que se cumple la teoría.

Como los parámetros que interesa observar son el periodo y el ángulo, se fijará una altura de ola significativa unitaria ( $H_s=1$ ) y a cada altura de ola se le va a someter a dos periodos, uno corto ( $T_p=7$  s) y otro largo ( $T_p=14$  s). Además, para cada uno de estos dos periodos se plantearán cuatro repeticiones con ángulos diferentes ( $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$  y  $45^\circ$ ) para verificar que dependiendo de cuál sea el ángulo la altura de ola puede aumentar o disminuir dentro, en los laterales y fuera del canal.

Finalmente, los últimos parámetros son  $\gamma$  (grado de apuntamiento del espectro) y  $\delta$  (anchura o dispersión direccional). El valor del grado de apuntamiento del espectro será 5 en todos los casos y el de la anchura o dispersión direccional será  $\pm 10^\circ$ . Estos dos valores vienen del espectro de JONSWAP con una forma frecuencial tipo SEA y muy cerrada direccionalmente (típico de oleajes de media-alta energía).

El espectro de JONSWAP (JOint North Sea WAve Project) extiende el espectro de Pierson-Moskowitz (P-M) (propuesto para oleaje totalmente desarrollado) para incluir oleajes limitados por el fetch. Su ecuación es la siguiente:

$$S(w) = \alpha \times g^2 \times w^{-5} \times e^{-1.25 \times \left(\frac{w}{w_p}\right)^{-4}} \times \gamma^\delta$$

Donde  $\gamma^\delta$  : factor de intensificación del pico (añadido al espectro P-M para representar las formas espectrales más estrechas y apuntadas, que son típicas del oleaje parcialmente desarrollado)

$\gamma$ : describe el grado de apuntamiento del espectro ( $\gamma = 1$  a  $7$ )

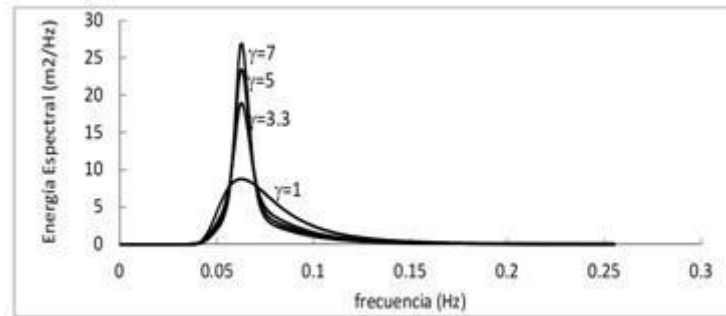
$\delta$ : anchura o dispersión direccional, describe la anchura de la región cercana al pico (°)

En la Figura 18 mostrada a continuación, se puede observar cómo ' $\gamma$ ' controla que el espectro sea más ancho o más estrecho, es decir, que se reparta la energía alrededor del periodo de pico en mayor o menor medida. Un  $\gamma=3,3$  reparte mucho la energía a lo largo de toda la frecuencia (oleaje que tiende a una apariencia tipo SEA) y un  $\gamma=10$  es un espectro en el que toda la energía está muy cerca del periodo de pico (oleaje tipo SWELL, muy regular).



En este trabajo se considera un valor de  $\gamma=5$  para que el espectro esté un poco concentrado, que no se disperse mucho energéticamente, como se puede ver en la Figura 18.

Figura 18. Grado de apuntamiento del espectro  $\gamma$



Fuente: Google

Por otro lado,  $\delta$  abarca el abanico direccional desde el que puede venir el oleaje, ya que el espectro no viene únicamente de una dirección, sino que viene de un abanico direccional regido por una dirección media. En este caso, se considera  $\delta=\pm 10^\circ$ . Esto quiere decir que, si por ejemplo el oleaje procede del norte, tiene un abanico direccional de  $\pm 10^\circ$  desde esta dirección norte por el que puede venir.

Por tanto, la tabla de casos con los forzamientos quedaría así:

Tabla 5. Forzamientos

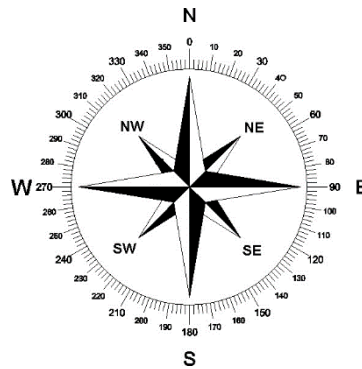
CASO	$H_s$ (m)	$T_p$ (s)	$\theta$ (°)	$\gamma$	$\delta$
1	1	7	270 (0°)	5	10
2	1	14	270 (0°)	5	10
3	1	7	285 (15°)	5	10
4	1	14	285 (15°)	5	10
5	1	7	300 (30°)	5	10
6	1	14	300 (30°)	5	10
7	1	7	315 (45°)	5	10
8	1	14	315 (45°)	5	10

Fuente: Elaboración Propia

Estos forzamientos se incluyen en el Excel de oleaje (fichero XLS que será dato de entrada para los modelos numéricos SWAN y MSP). En este Excel, la dirección del oleaje ( $\theta$ ) se muestra con ángulos relativos al eje del canal en náuticas (Norte igual a cero, y en sentido de las agujas del reloj), ya que los modelos numéricos trabajan con estos ángulos.



Figura 19. Ángulos Náuticos



Fuente: Google

De esta forma, como la dirección ( $\theta$ ) se muestra con ángulos relativos al eje del canal, según la orientación del canal que se puede ver en la Figura 16 (el eje del canal va del oeste W al este E), la dirección del oleaje será la siguiente:

$$\begin{aligned} 0^\circ &= 270^\circ \text{ (W)} \\ 15^\circ &= 270 + 15 = 285^\circ \\ 30^\circ &= 270 + 30 = 300^\circ \\ 45^\circ &= 270 + 45 = 315^\circ \text{ (NW)} \end{aligned}$$

Habrà por tanto oleaje procedente del oeste W ( $270^\circ$ ) hasta oleaje procedente del noroeste NW ( $315^\circ$ ).

### 4.3. Modelos numéricos empleados

Los modelos numéricos que se emplean en este trabajo son el modelo SWAN y el modelo MSP.

#### 4.3.1. Modelo SWAN

Durante las dos últimas décadas, se han desarrollado varios modelos espectrales avanzados de onda de viento (advanced spectral wind-wave models), conocidos como modelos de tercera generación. SWAN (acrónimo de Simulating WAVes Nearshore) es un modelo de olas de tercera generación que se usa para obtener estimaciones realistas de los parámetros del oleaje en zonas costeras, lagos y estuarios, a partir de determinadas condiciones de viento, fondo y corriente.

Basado en la ecuación de balance de acción de olas (wave action balance equation) con fuentes y sumideros, el modelo de olas de aguas poco profundas SWAN es una extensión de los modelos de olas de tercera generación de aguas profundas. Es totalmente espectral (en todas las direcciones y frecuencias) y calcula la evolución de las olas de viento en regiones costeras con aguas poco profundas y corrientes ambientales.

El modelo SWAN no considera los problemas a escala oceánica, calcula la propagación de las olas desde las aguas profundas hasta la zona de oleaje (surf zone).

SWAN, por ser un modelo de olas de tercera generación, resuelve la ecuación de balance de acción de las olas (o balance de energía en ausencia de corrientes) (wave action balance equation or energy balance in the absence of currents) con fuentes y sumideros.

Resuelve la **ecuación de balance de acción espectral (spectral action balance equation)** sin ninguna restricción a priori sobre el espectro para la evolución del crecimiento de las olas. Esta ecuación representa los efectos de la propagación espacial, la refracción, los bancos, la generación, la disipación y las interacciones no lineales entre las ondas.

Toda la información sobre la superficie del mar está contenida en el espectro de varianza de las olas o densidad de energía  $E(\sigma, \theta)$ , distribuyendo la energía de las olas sobre las frecuencias (de radianes)  $\sigma$  y las direcciones de propagación  $\theta$  (la dirección normal de la cresta de las olas de cada componente espectral).

Normalmente, los modelos de onda determinan la evolución de la densidad de acción  $N(\tilde{x}, t; \sigma, \theta)$  en el espacio  $\tilde{x}$  y el tiempo  $t$ . La densidad de acción se define como  $N = E/\sigma$  y se conserva durante la propagación a lo largo de su característica de onda en presencia de corriente ambiental, mientras que la densidad de energía  $E$  no (Whitman, 1974). Se supone que la corriente ambiente es uniforme con respecto a la coordenada vertical y se denomina  $\tilde{U}$ .

La tasa de cambio de la densidad de acción  $N$  en un único punto en el espacio  $(\tilde{x}; \sigma, \theta)$  se rige por la ecuación del balance de acción:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla_{\tilde{x}} \cdot \left[ \left( \vec{c}_g + \vec{U} \right) N \right] + \frac{\partial c_{\sigma} N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_{\theta} N}{\partial \theta} = \frac{S_{tot}}{\sigma}$$

El lado izquierdo es la parte cinemática de esta ecuación. El segundo término denota la propagación de la energía de las olas en un espacio geográfico bidimensional  $\tilde{x}$ -espacio, incluyendo el asomeramiento, con la velocidad de grupo  $\tilde{c}_g = \partial \sigma / \partial \tilde{k}$  siguiendo la relación de dispersión  $\sigma^2 = g|\tilde{k}| \tanh(|\tilde{k}|d)$  donde  $\tilde{k}$  es el número de onda vectorial y  $d$  la profundidad del agua. El tercer término representa el efecto del desplazamiento de la frecuencia del radián debido a las variaciones en la profundidad y las corrientes medias. El cuarto término representa la refracción inducida por la profundidad y la inducida por la corriente. Las cantidades  $c_{\sigma}$  y  $c_{\theta}$  son las velocidades de propagación en el espacio espectral  $(\sigma, \theta)$ . Observe que el segundo, tercer y cuarto términos son términos de divergencia que representan la cantidad de flujo que entra o sale de un punto, y por lo tanto, actúan como términos de origen (divergencia negativa, es decir, flujo que entra en un punto) o de hundimiento (divergencia positiva, es decir, flujo que sale de un punto). El lado derecho contiene  $S_{tot}$ , que es el término no conservador de fuente/sumidero que representa todos los procesos físicos que generan, disipan o redistribuyen la energía de las olas en un punto. Estos procesos se definen para la densidad de energía  $E(\sigma, \theta)$  (no para la acción de las olas).

El modelo SWAN es capaz de representar los siguientes **procesos de propagación de ondas**:

- propagación a través del espacio geográfico,
- debido a las variaciones espaciales en el fondo y la corriente,
- difracción,
- debido a las variaciones espaciales en el fondo y la corriente,
- bloqueo y reflexiones por corrientes opuestas y
- transmisión, bloqueo o reflexión contra obstáculos.

Y también **procesos de generación y disipación de ondas** como:

- generación eólica,
- disipación por medio de un tapado blanquecino,
- por el rompimiento de olas inducido por la profundidad,
- disipación por fricción del fondo y
- interacciones entre las olas de las olas en aguas profundas y poco profundas.

La difracción se modela en un sentido restringido, por lo que el modelo debe utilizarse en áreas donde las variaciones en la altura de las olas son grandes dentro de una escala horizontal de unas pocas longitudes de onda.

Para acomodar la difracción en las simulaciones SWAN, se sugiere una aproximación de la difracción de refracción desacoplada por fase (Holthuijsen et al., 2003). Se expresa en términos de la velocidad de giro direccional de las componentes de onda individuales en el espectro de onda 2D. La aproximación se basa en la ecuación de pendiente suave para la refracción y difracción, omitiendo la información de fase. Por lo tanto, no permite campos de ondas coherentes en el dominio computacional.

La aproximación de difracción SWAN puede utilizarse en la mayoría de las situaciones en las que se absorben o reflejan litorales de océanos, mares, bahías, lagunas y fiordos con un obstáculo ocasional como isletas, rompeolas o cabeceras, pero NO en puertos o frente a rompeolas reflectantes o cerca de paredes de acantilados definidos por las paredes. Detrás de los rompeolas (que pueden estar reflejando), los resultados de SWAN parecen razonables si se cumplen las condiciones anteriores.

SWAN es estacionario y opcionalmente no estacionario y se puede aplicar en coordenadas cartesianas o curvilíneas (se recomienda sólo para escalas pequeñas) o esféricas (escalas pequeñas y escalas grandes). El modo estacionario debe usarse sólo para olas con un tiempo de residencia relativamente corto en el área computacional bajo consideración, es decir, el tiempo de viaje de las olas a través de la región debe ser pequeño comparado con la escala de tiempo de la geofísica. condiciones (condiciones límite de las olas, viento, mareas y mareas de tempestad).

Una definición de SWAN está relacionada con la inclusión de la energía lateral. La energía lateral puede ser o no ser considerada en el caso de un ángulo de  $0^\circ$  (simetría perfecta), sin embargo, debe ser considerada en los casos de onda incidente oblicua. De lo contrario, la malla debería ser extremadamente amplia para que los efectos de borde no afecten a la zona de estudio.

De acuerdo con su manual, SWAN propaga los efectos de las condiciones de contorno en las esquinas del área de modelado dentro de un ángulo de  $30^\circ$  (con respecto a la dirección media de las olas) para el oleaje de viento (wind waves) y de la mitad de la dispersión direccional definida para el oleaje swell (swell waves).

La cuestión clave es el número máximo de iteraciones necesarias para cubrir la propagación de la energía en todo el dominio del modelo. El proceso iterativo funciona desde la iteración  $S=1$  hasta  $s=S$  y termina si el número máximo de iteraciones (normalmente 50) es alcanzado o si se cumplen unos criterios para la altura de ola significativa  $H_{M0}$  y periodo medio relativo de oleaje  $T_{m01}$  en al menos el 98% de todos los puntos de la malla.

Los datos de entrada que requiere este modelo son:

1. Batimetría de la zona de estudio: Se necesitará por un lado la batimetría sin canal y por otro la batimetría con canal. El fichero de batimetría debe ser un archivo \*.dat en formato libre (ASCII) y preferiblemente proyectado en coordenadas UTM (metros) para que la propagación sea coherente espacialmente.

2. Mallas de propagación de oleaje: El modelo está preparado para propagar el oleaje en dos mallas que hay que diseñar: una general y una malla de detalle. En este proyecto no es necesaria la malla de detalle, por lo que a la hora de ejecutar el programa se seleccionará la opción "Solo ejecuta la malla general".
3. Forzamientos: otro dato de entrada es el fichero XLS que se mencionó en el apartado "4.2. Forzamientos" con los distintos casos de oleaje con sus características (altura de ola significativa  $H_s$ , periodo pico  $T_p$ , dirección de oleaje  $\theta$ , grado de apuntamiento del espectro  $\gamma=5$  y dispersión direccional  $\delta=\pm 10^\circ$ ).

Finalmente, los datos de salida que aporta SWAN son ficheros de la serie de oleaje ( $H_s$ ,  $T_p$ , Dir) en formato \*.MAT (Matlab) y en formato libre (ASCII). Se generan tablas y gráficos de la rosa de oleaje, régimen medio, régimen extremal, histogramas ( $H_s$  vs  $T_p$ ) y flujo medio de energía.

El modelo SWAN suele ser usado de manera general en los estudios de propagación de oleaje, de cara al diseño funcional y estructural de obras costeras, por lo que se puede considerar como el modelo estándar que la técnica general lleva adoptando a lo largo de los últimos 10 años.

#### 4.3.2. Modelo MSP

Los modelos basados en la aproximación elíptica de la ecuación de la pendiente suave MSP (elliptic mild slope equations), se emplean para estudiar los siguientes efectos que experimenta el oleaje: refracción, difracción, asomeramiento y disipación de energía debida a la fricción con el fondo.

Cuando el oleaje se encuentra con estructuras de protección costera y/o instalaciones portuarias, aparecen procesos de reflexión del oleaje (parcial o total), interacción oleaje-estructura y en ocasiones, disipación del oleaje, por efecto de la rotura.

Estos modelos MSP ofrecen una manera práctica y eficaz, de evaluar adecuadamente la agitación portuaria, considerando contornos batimétricos reales, y batimetrías complejas para oleaje irregular.

Ha sido empleado con éxito en diversos proyectos de investigación, consultoría y apoyo técnico desde el año 2001 a la fecha, obteniéndose resultados excelentes y un desempeño muy competitivo.

El modelo MSP (GIOU, 2001), en su versión espectral, resuelve las ecuaciones de la pendiente suave antes mencionadas, con un esquema numérico de elementos finitos.

Asumiendo que el movimiento del agua es irrotacional, es posible estudiar el fenómeno de la propagación del oleaje por medio de una función potencial. Además, si la batimetría de la zona de análisis puede ser considerada como de pendiente suave, el problema puede ser descrito por medio de una ecuación bidimensional integrada en profundidad entre el fondo y la superficie libre, conocida como ecuación de refracción-difracción o "mild-slope equation". Dependiendo de otras aproximaciones adicionales, se puede obtener modelos más simplificados, como el modelo parabólico de refracción-difracción.

El sistema completo de refracción-difracción ("mild-slope equation") fue introducido inicialmente por Berkhoff, (1972), y desarrollado por Behrendt, (1985). Dicho sistema puede ser expresado por:

$$\nabla(\Gamma C C_g \nabla \Phi) + \frac{w^2 C}{C_g} \Phi = 0$$

donde:

$\nabla$	=	operador gradiente [ $\nabla = (\delta x, \delta y)$ ]
$\Gamma$	=	factor de fricción
$C$	=	celeridad ( $C = w/k$ )
$C_g$	=	celeridad de grupo ( $C_g = \delta w / \delta k$ )
$\Phi$	=	potencial de velocidad ( $v = \nabla \Phi$ )
$k$	=	número de onda ( $w^2 = gk \tanh kh$ )
$g$	=	gravedad
$h$	=	profundidad
$a$	=	amplitud de onda

Esta ecuación es de tipo elíptico, necesiándose para su resolución condiciones de contorno a lo largo de todo el dominio de integración; éstas pueden ser: a) reflexión total o parcial en contornos fijos, b) onda incidente conocida o condición de radiación en contornos abiertos. La resolución del sistema anterior puede realizarse por medio de métodos en elementos finitos.

En nuestro caso particular, el estudio de propagación de oleaje en el interior del puerto debe realizarse por medio de la resolución de la versión elíptica de la "*mild-slope equation*", no sólo por los mejores resultados obtenidos por el análisis de Berkhoff, sino por la imposibilidad de los métodos parabólicos para estudiar las reflexiones interiores.

El modelo MSP es capaz de resolver en un dominio numérico bidimensional, los procesos lineales de refracción, difracción, asomeramiento, y reflexión (total y parcial), y los procesos de disipación del flujo de energía por fricción y rotura del oleaje.

La ecuación de la pendiente suave se resuelve mediante un método híbrido de elementos finitos desarrollado originalmente por Behrendt, (1985), capaz de resolver la ecuación de Helmholtz con fondo variable.

En este análisis, el dominio de estudio se divide en dos regiones: región cercana, A, y región lejana, R.

Para la región A se utiliza un método convencional de elementos finitos, mientras que para la región R se utiliza una solución analítica con coeficientes desconocidos. Se establece un principio variacional con un funcional adecuado, de modo que las condiciones de compatibilidad se satisfagan a lo largo de la región A.

Los datos de entrada que requiere este modelo son:

1. Batimetría de la zona de estudio: Se necesitará por un lado la batimetría sin canal y por otro la batimetría con canal. El fichero de batimetría debe ser un archivo \*.dat en formato libre (ASCII) y preferiblemente proyectado en coordenadas UTM (metros) para que la propagación sea coherente espacialmente.

2. Contorno portuario: Una vez cargada la batimetría, se realiza el mallado para la agitación portuaria. Para ello se necesita realizar el montaje de los contornos, dibujando primero el dominio en CAD (montaje\_contornos\_MSP.dwg). Una vez dibujado en CAD, se extraen los puntos del contorno portuario dibujado y se guardan en dos ficheros: "CONTORNO\_01\_West.dat" y "CONTORNO\_02\_NorthWest.dat", que incluyen las coordenadas de X-Y (en UTM) de cada nodo del dominio. Estos ficheros son los que utiliza el modelo MSP para realizar el mallado. El motivo de utilizar dos ficheros de contorno es que se consideran oleajes del oeste W (270°) hasta el noroeste NW (315°), como se mencionó en el apartado "4.2. Forzamientos".
3. Forzamientos: otro dato de entrada es el fichero XLS que se mencionó en el apartado "4.2. Forzamientos" con los distintos casos de oleaje con sus características (altura de ola significativa  $H_s$ , periodo pico  $T_p$ , dirección de oleaje  $\theta$ , grado de apuntamiento del espectro  $\gamma=5$  y dispersión direccional  $\delta=\pm 10^\circ$ ).

Finalmente, los datos de salida que aporta son ficheros de la serie de oleaje ( $H_s$ ,  $T_p$ , Dir) en formato \*.MAT (Matlab) y en formato libre (ASCII). Se generan tablas y gráficos de la rosa de oleaje, régimen medio, régimen extremal, histogramas ( $H_s$  vs  $T_p$ ) y flujo medio de energía.

#### 4.3.3. Resumen

Tabla 6. Comparación SWAN vs MSP

Característica	SWAN	MSP
Ecuación que resuelve	Ecuación de balance de acción de ondas (Wave Action Balance Equation)	Ecuación de la pendiente suave MSP (elliptic mild slope equations)
Procesos físicos que resuelve	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Generación por viento</li> <li>• Disipación por fricción en el fondo y rotura inducida por la profundidad</li> <li>• Transmisión parcial y reflexión</li> <li>• Transmisión y reflexión contra obstáculos</li> <li>• Propagación y asomeramiento</li> <li>• Interacción de olas y corrientes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reflexión</li> <li>• Difracción</li> <li>• Asomeramiento</li> <li>• Reflexión total y parcial</li> <li>• Disipación del flujo de energía por fricción y rotura del oleaje.</li> </ul>

Fuente: Elaboración Propia



#### 4.4. Escenarios de ejecución y montaje de los modelos

##### 4.4.1. Escenarios

Se proponen 4 escenarios, de forma que se ejecutarán un total de 32 casos, 16 para cada modelo (SWAN y MSP).

*Tabla 7. Escenarios de ejecución, caso teórico.*

Modelo/Geometría	Sin canal	Con canal	Total
SWAN	Escenario 1, 8 casos	Escenario 2, 8 casos	16 casos
MSP	Escenario 3, 8 casos	Escenario 4, 8 casos	16 casos
Total	16 casos	16 casos	<b>32 casos</b>

*Fuente: Elaboración Propia*

En primer lugar, se realiza un estudio de la situación sin canal para ambos modelos SWAN y MSP (Escenarios 1 y 3 respectivamente). El objetivo del análisis de la situación sin canal es cuantificar que la propagación numérica es adecuada (para saber qué cambios se producen por el canal y qué cambios se producen por ser ejecutados con distintos modelos numéricos).

En segundo lugar, se realizará el estudio de la situación con canal (Escenarios 2 y 4) para SWAN y para MSP.

Los forzamientos de los 8 casos a estudiar en cada escenario se han mostrado en el apartado 4.2 de este trabajo.

##### 4.4.2. Montaje

En este apartado se mostrará el montaje de cada modelo numérico, específicamente con respecto al diseño de la malla numérica.

La información base para mallar es la que se mostró la Figura 16, en el caso con canal y en la Figura 17, en el caso sin canal.

##### 4.4.2.1. SWAN

Para trabajar con el modelo SWAN, es necesario obtener en primer lugar la batimetría de la zona de estudio: la batimetría sin y con canal. Para obtener dichas batimetrías, se utiliza el software técnico Matlab. SWAN es un modelo que puede ser usado bajo una malla regular de elementos rectangulares (que suelen ser del mismo tamaño) y propaga el oleaje de forma energética considerando la variación batimétrica que tiene entre nodo y nodo de la malla.

Una vez cargada la batimetría, el siguiente paso es definir las mallas de propagación de oleaje. El modelo está preparado para propagar el oleaje en dos mallas que hay que diseñar: una general y una malla de detalle. En este proyecto no es necesaria la malla de detalle, por lo que a la hora de ejecutar el programa se seleccionará la opción “Solo ejecuta la malla general”. El modelo SWAN usa una malla estructurada de rectángulos de un tamaño equivalente, en la cual el oleaje se propagará heredando en cada nodo la profundidad que tiene justo por debajo.

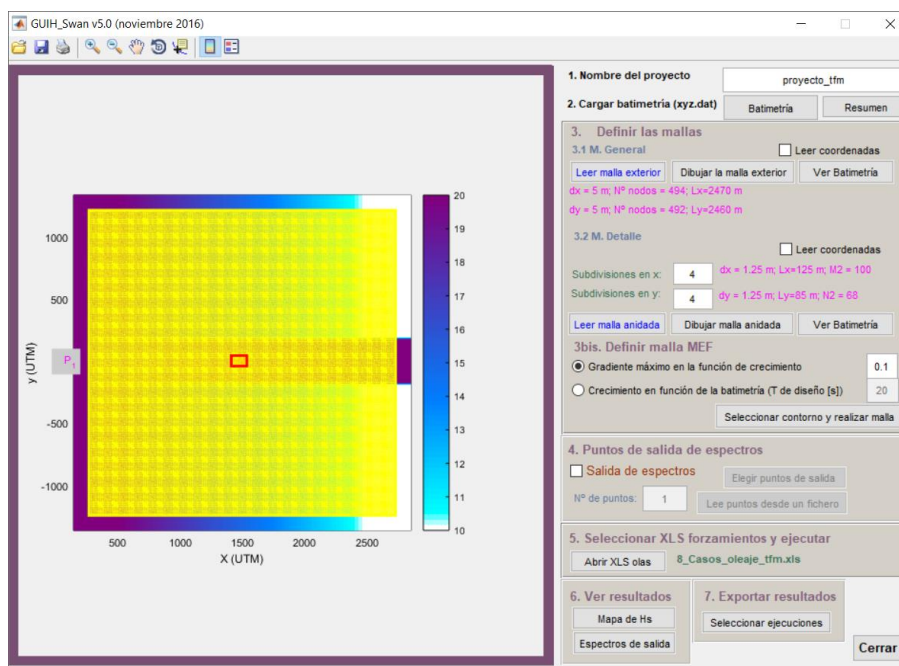
Para la realización del mallado, el modelo SWAN necesita preestablecer un tamaño de malla que sea adecuado para poder representar la batimetría de cara al experimento. Para ello, se realiza un análisis de sensibilidad del tamaño de la malla con base en la batimetría con canal, debido a que interesa que defina adecuadamente los taludes del canal, la profundidad... etc.

Por lo tanto, en este estudio se proponen 3 diferentes incrementos de malla: 20, 10 y 5 metros ( $D_x=D_y=20$  m, 10 m y 5 m) y se someten a un oleaje representativo del problema de estudio con el objetivo de verificar cuál es más adecuado (análisis de sensibilidad). Se necesita una malla lo suficientemente fina para que el canal y los procesos se vean.

Tras la ejecución de los casos planteados en la Tabla 5 con los 3 diferentes incrementos de malla, puesto que el tiempo de ejecución es razonable (2 horas y media), se escoge una malla de resolución del dominio en 'x' y en 'y' de 5 metros ( $D_x=D_y=5$  m), ya que es más densa, representa mejor la geometría del canal y por tanto el oleaje que se propaga está mucho mejor calculado.

En el caso del modelo SWAN únicamente es necesario un dominio, porque permite que el oleaje entre por todos los lados de agua del dominio (es una ventaja de uso del modelo). Por tanto, para este estudio se plantea el siguiente dominio numérico, mostrado en la Figura 20, que se extiende en todo el área del experimento.

Figura 20. Dominio SWAN



Fuente: Elaboración Propia

Esta Figura 20 muestra la apariencia de dicho dominio en la interfaz gráfica para una resolución de 5x5m.

Finalmente, se selecciona el Excel de forzamientos, con lo que comienza la ejecución de los casos de oleaje que se plantearon en la Tabla 5.

#### 4.4.2.2. MSP

En primer lugar, para poder trabajar con el modelo MSP, es necesaria la batimetría de la zona de estudio: la batimetría sin y con canal. Una vez cargada la batimetría, se realiza el mallado para la agitación portuaria.

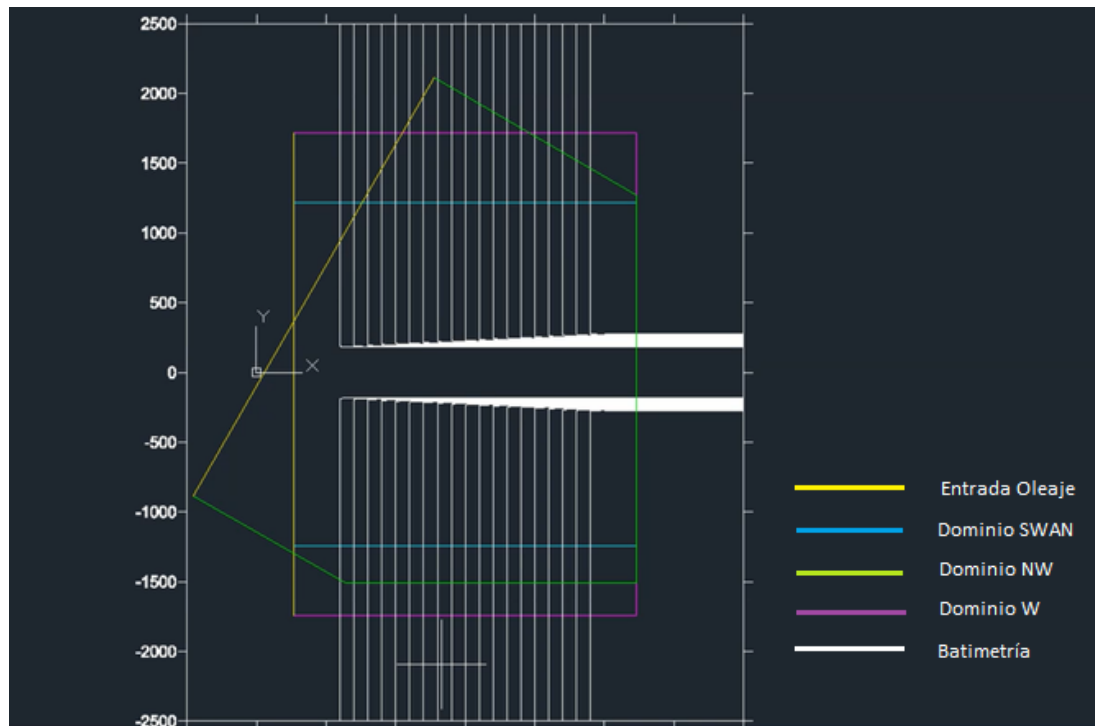
A la hora de realizar el mallado para la agitación portuaria, el modelo MSP está preparado para propagar el oleaje en una sola malla no estructurada de elementos triangulares y adaptativos en función de la variación de la longitud de onda sobre el contorno batimétrico (concentra nodos en las zonas más someras y relaja nodos en las zonas más profundas del dominio).

Para poder realizar el mallado, es necesario realizar el montaje del contorno portuario. En este caso, para el modelo MSP se necesitan dos contornos: "CONTORNO\_01\_West.dat" y "CONTORNO\_02\_NorthWest.dat". Esto se debe a que el modelo MSP necesita usar mallas distintas dependiendo de la dirección de incidencia del oleaje, para que el contorno de entrada del modelo quede orientado lo más perpendicular posible a la zona de estudio. Por lo tanto, se proponen 2 dominios: uno para los oleajes del oeste W (270° y 285°) y otro para oleajes del noroeste NW (300° y 315°).

En este caso, de los 4 contornos que tiene el dominio MSP, uno de ellos se emplea para incluir el forzamiento.

A continuación, en la Figura 21 se muestra la apariencia que tienen estos dos dominios.

Figura 21. Dominios



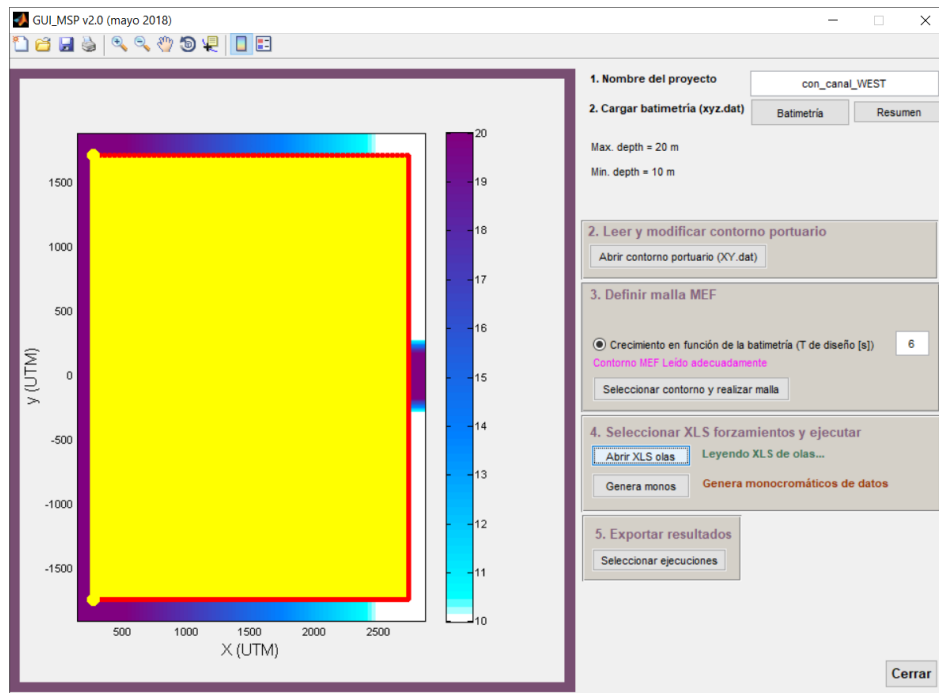
Fuente: Elaboración Propia

Como se puede ver en la Figura 21, para el montaje de los contornos MSP se considera la batimetría del experimento (en blanco), el dominio que se consideró en SWAN (en azul), el dominio MSP que puede recibir los oleajes del oeste (W) (en morado) y el dominio MSP que puede recibir el oleaje del noroeste (NW) (en verde). La línea amarilla representa la zona por donde entra el oleaje en cada dominio.

A la hora de ejecutar el modelo MSP, se necesita generar una batimetría más grande (más ancha y más larga), para que la coincidencia espacial entre el dominio SWAN y el dominio MSP concuerde perfectamente, y por lo tanto se puedan comprobar directamente.

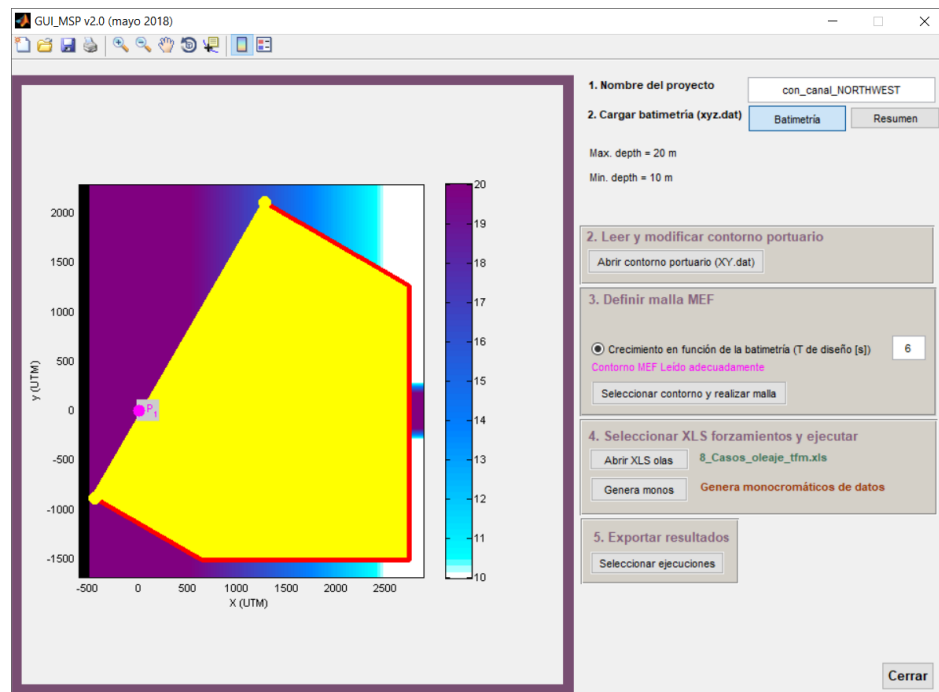
Por lo tanto, para este estudio se plantean los siguientes dominios numéricos con el modelo MSP, mostrados en la Figura 22 (en el caso de oleaje del oeste (W)) y en la Figura 23 (en el caso del oleaje del noroeste (NW)).

Figura 22. Dominio MSP, West W



Fuente: Elaboración Propia

Figura 23. Dominio MSP, NorthWest NW



Fuente: Elaboración Propia

Finalmente, para poder ejecutar el modelo MSP se necesita seleccionar el Excel de forzamientos.

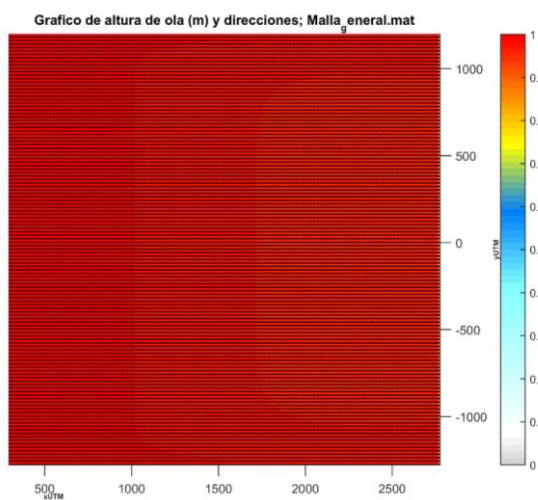
## 4.5. Resultados

### 4.5.1. Resultados sin canal para ambos modelos

El objetivo del análisis de la situación sin canal es demostrar que la propagación numérica es adecuada, que los resultados son coherentes, para saber qué cambios se producen por el canal y qué cambios se producen por ser ejecutados con distintos modelos numéricos, teniendo en cuenta que los procesos de transformación del oleaje que, a priori, imperarán dentro del dominio, son el asomeramiento y la refracción, que ambos modelos resuelven adecuadamente.

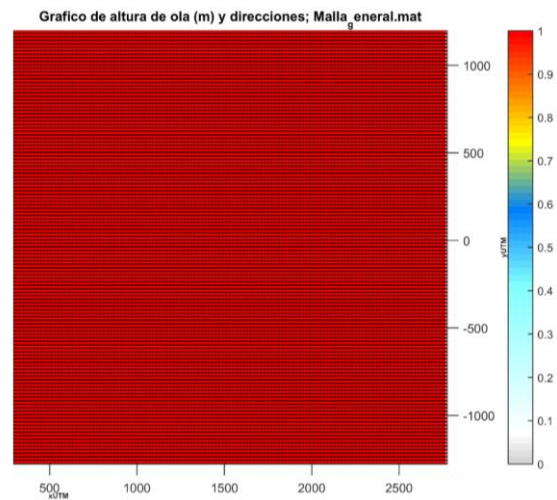
#### 4.5.1.1. SWAN

Figura 24. Caso 1: Dir=270° (0°), T=7s



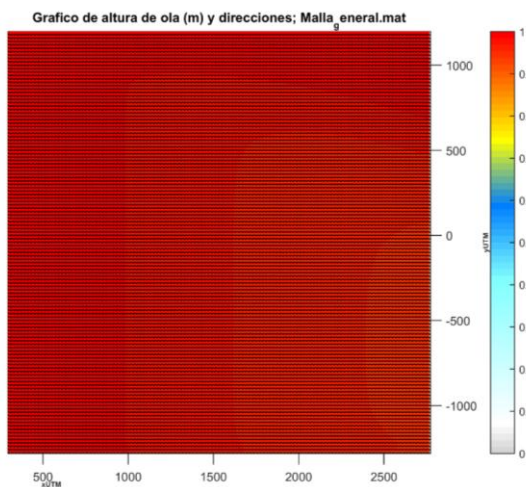
Fuente: Elaboración Propia

Figura 25. Caso 2: Dir=270° (0°), T=14s



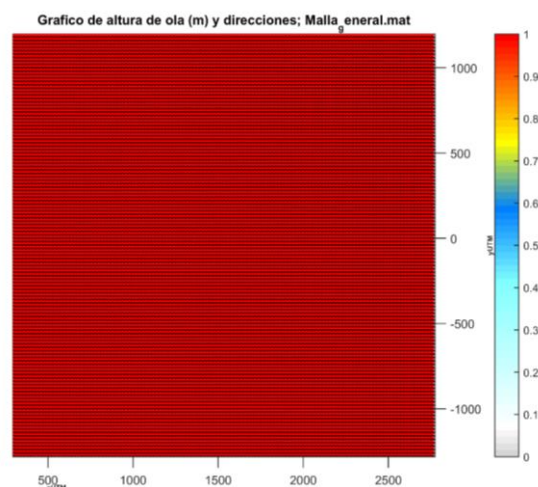
Fuente: Elaboración Propia

Figura 26. Caso 3: Dir=285° (15°), T=7s



Fuente: Elaboración Propia

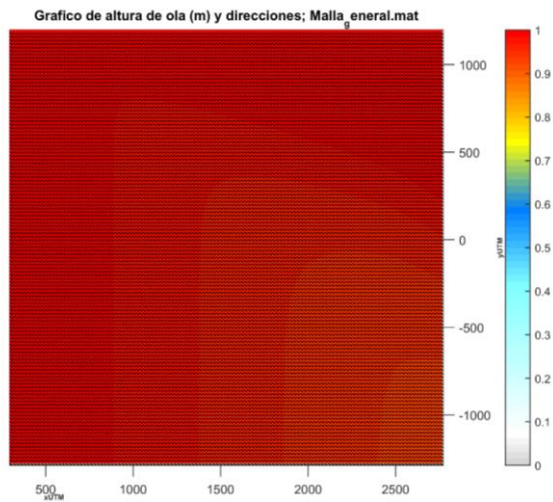
Figura 27. Caso 4: Dir=285° (15°), T=14s



Fuente: Elaboración Propia

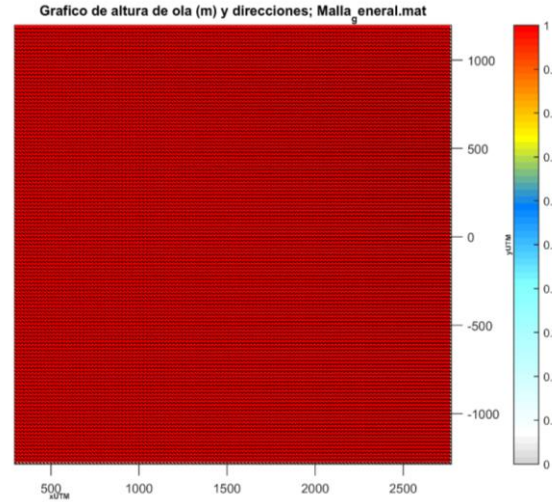


Figura 28. Caso 5: Dir=300° (30°), T=7s



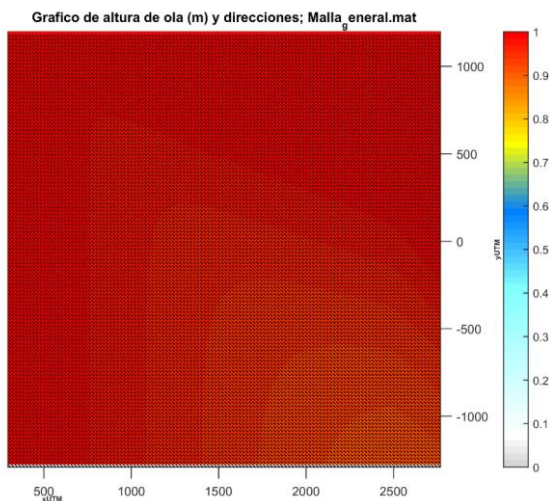
Fuente: Elaboración Propia

Figura 29. Caso 6: Dir=300° (30°), T=14s



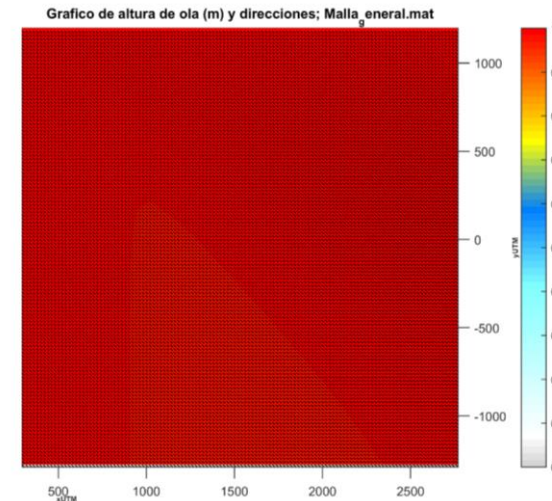
Fuente: Elaboración Propia

Figura 30. Caso 7: Dir=315° (45°), T=7s



Fuente: Elaboración Propia

Figura 31. Caso 8: Dir=315° (45°), T=14s

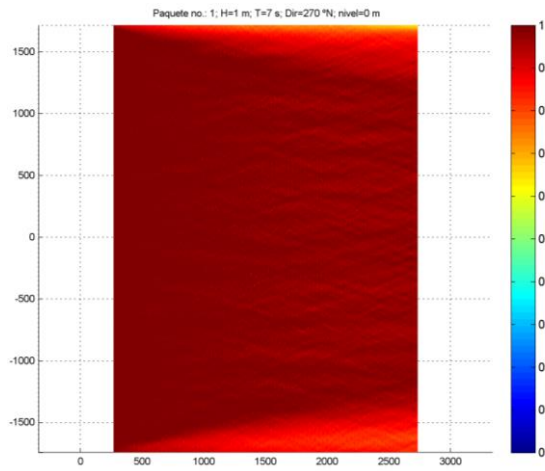


Fuente: Elaboración Propia

Como se mencionó en el apartado de procesos de propagación, cuando el oleaje incide oblicuamente a la batimetría, se produce conjuntamente asomeramiento y refracción. Estos procesos se muestran en las figuras anteriores, por lo que el programa SWAN ejecuta bien los procesos, tal y como era de esperar.

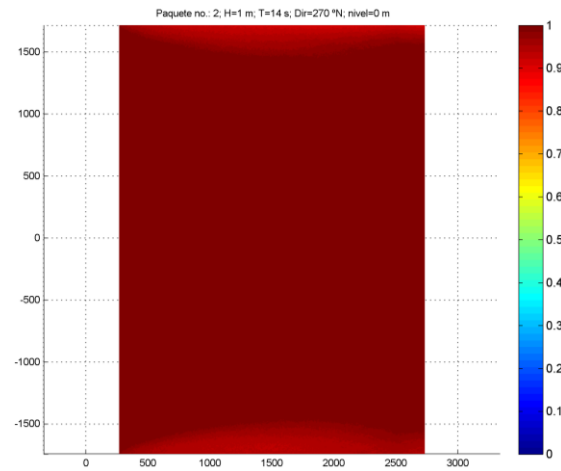
#### 4.5.1.2. MSP

Figura 32. Caso 1: Dir=270° (0°), T=7s



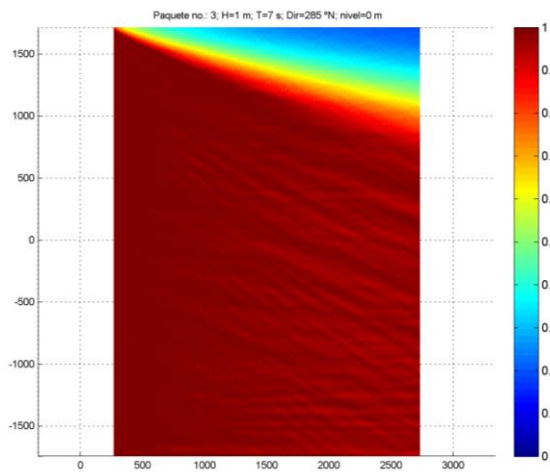
Fuente: Elaboración Propia

Figura 33. Caso 2: Dir=270° (0°), T=14s



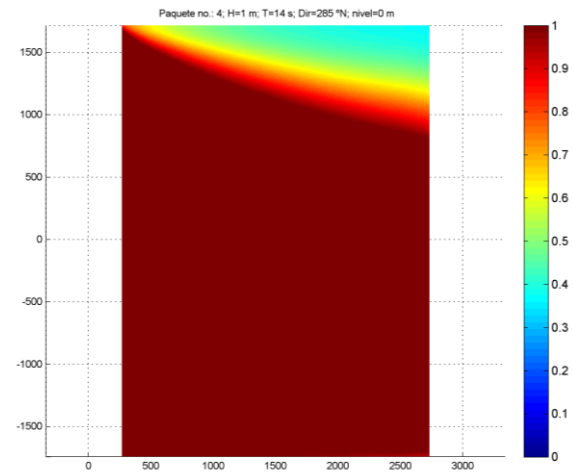
Fuente: Elaboración Propia

Figura 34. Caso 3: Dir=285° (15°), T=7s



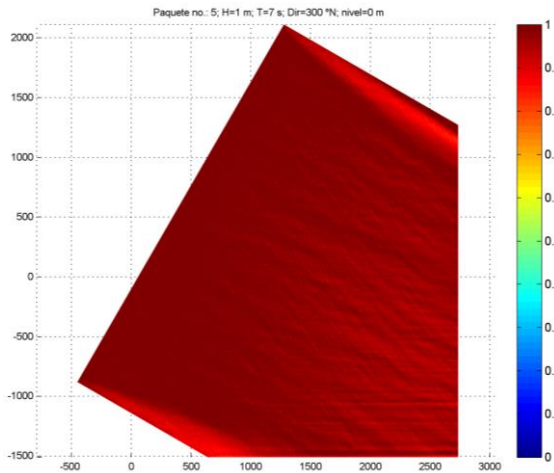
Fuente: Elaboración Propia

Figura 35. Caso 4: Dir=285° (15°), T=14s



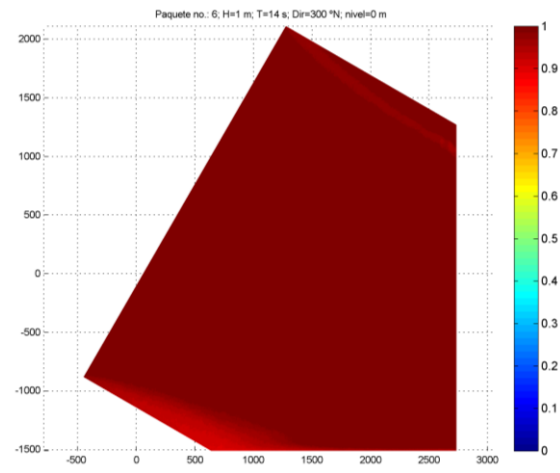
Fuente: Elaboración Propia

Figura 36. Caso 5: Dir=300° (30°), T=7s



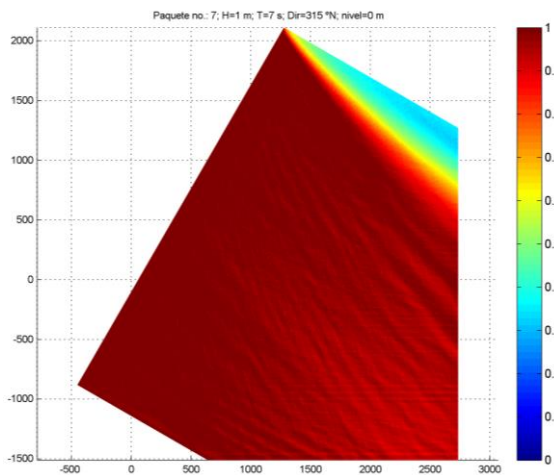
Fuente: Elaboración Propia

Figura 37. Caso 6: Dir=300° (30°), T=14s



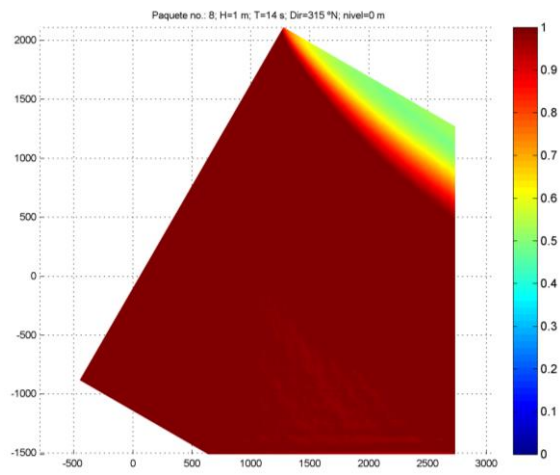
Fuente: Elaboración Propia

Figura 38. Caso 7: Dir=315° (45°), T=7s



Fuente: Elaboración Propia

Figura 39. Caso 8: Dir=315° (45°), T=14s



Fuente: Elaboración Propia

Como se mencionó en el apartado de procesos de propagación, cuando el oleaje incide oblicuamente a la batimetría, se produce conjuntamente asomeramiento y refracción. Si en su propagación las ondas encuentran un obstáculo, se difracta contra el mismo. Estos procesos se muestran en las figuras anteriores, por lo que el programa MSP ejecuta bien los procesos.

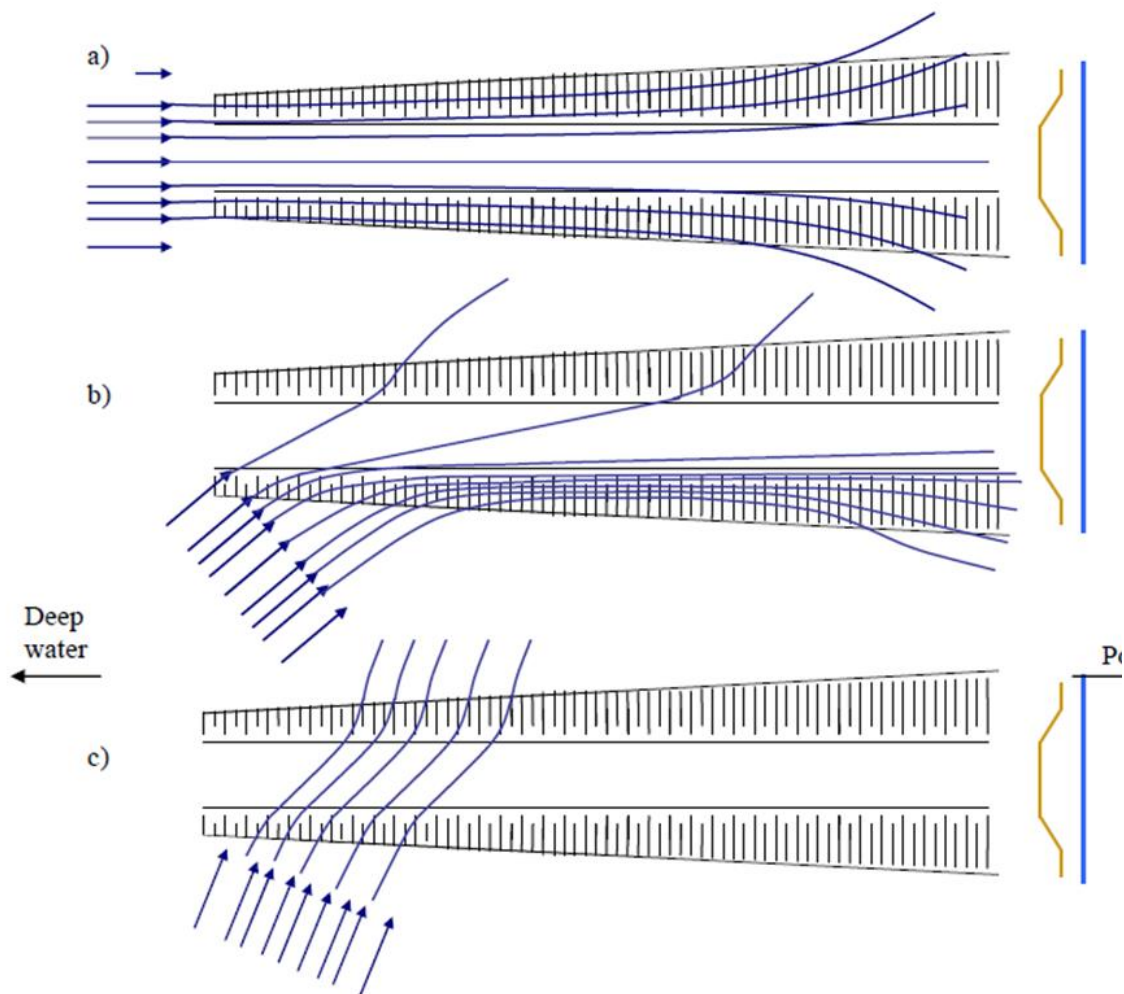
La “difracción numérica” que se puede observar en algunas de las figuras anteriores se trata de un comportamiento habitual del modelo MSP, al solo contar con un contorno de forzamiento. No obstante, el dominio numérico se ha diseñado para que esta zona de “difracción numérica” quede lejos del área de interés, y por lo tanto no supone una afección en la comparativa entre los dos modelos.



#### 4.5.2. Resultados comparativos con canal para ambos modelos

El objetivo del análisis de la situación con canal es verificar que se observan los procesos comentados en la teoría sobre cómo afecta la presencia del canal al oleaje dependiendo del ángulo con el que incida dicho oleaje sobre el canal. Estos posibles ángulos son los que se muestran a continuación en la Figura 40 (que se vuelve a presentar para ayudar a entender los resultados numéricos que aquí se recogen).

*Figura 40. Olas propagándose en 3 direcciones diferentes por el canal de navegación: a) Longitudinalmente, b) bajo el ángulo crítico y c) bajo un ángulo mayor que el crítico*



*Fuente: (Guzman Mardones, 2011).*

La sensibilidad de la respuesta del canal al forzamiento de la onda incidente se probó simulando períodos de onda de 7 y 14 s y direcciones de onda medias de 0°, 15°, 30° y 45°.

A continuación, se presentarán las comparaciones entre ambos modelos SWAN y MSP para las tres posibilidades de propagación mostradas en la figura anterior. Para el tipo a) se han tomado los casos 1 y 2, para el tipo b) se han tomado los casos 3 al 6 y para el tipo c) se han tomado los casos 7 y 8, como se refleja en la siguiente tabla.

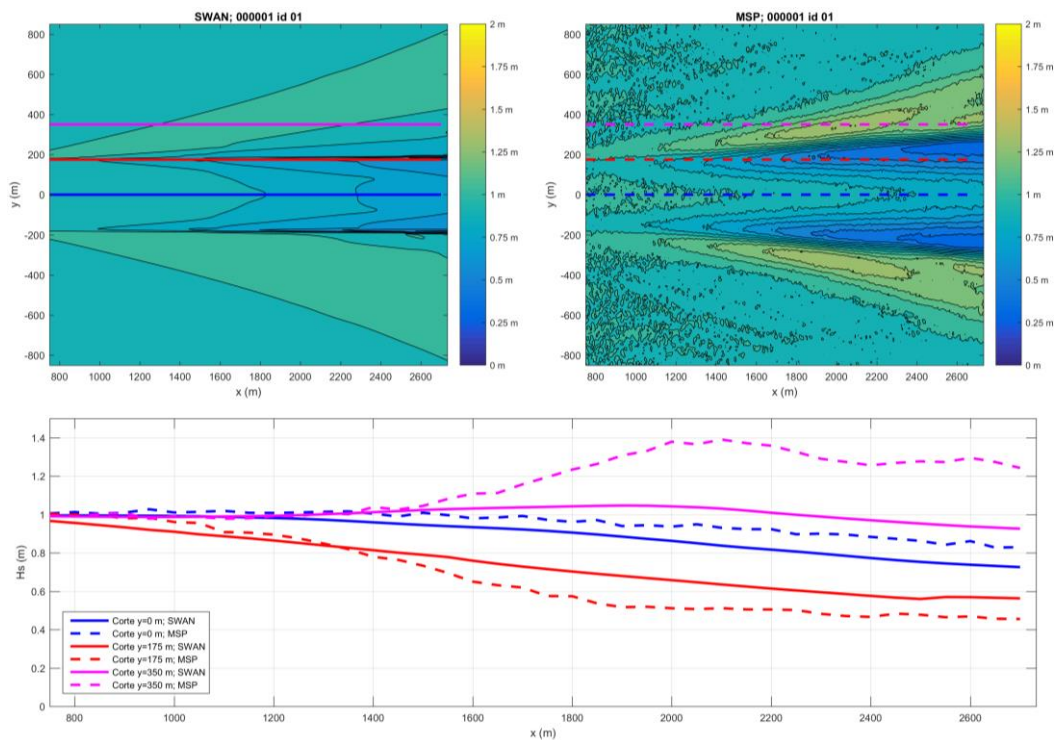
Tabla 8. Asociación de los casos con las posibilidades de propagación

Tipo	Descripción	Casos
a) $\theta \approx 0^\circ$	Oleaje propagándose longitudinalmente a lo largo del canal	1 y 2
b) $\theta \leq \theta_{cr}$	Oleaje propagándose bajo un ángulo menor que el crítico	3, 4, 5 y 6
c) $\theta > \theta_{cr}$	Oleaje propagándose bajo un ángulo mayor que el crítico	7 y 8

Fuente: Elaboración Propia

#### 4.5.2.1. Resultados para tipo a) Olas propagándose longitudinalmente

Figura 41. Caso 1:  $Dir=270^\circ$  ( $0^\circ$ ),  $T=7s$



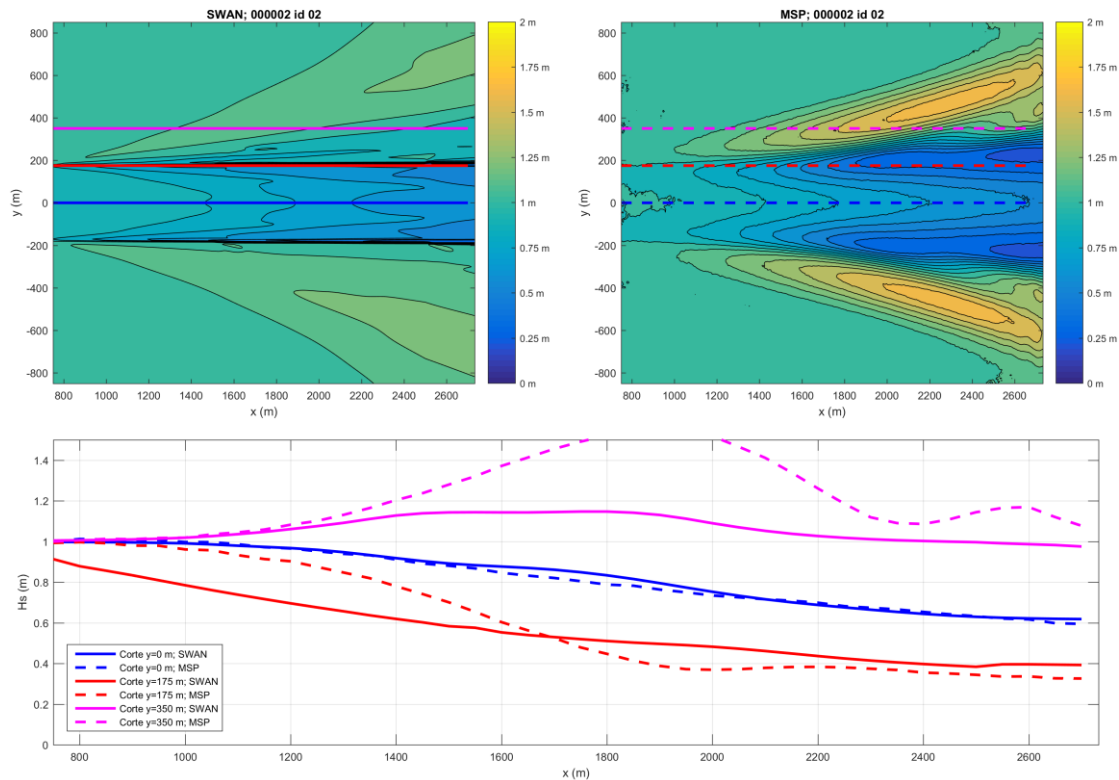
Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 41 se muestra la comparación del caso 1 ejecutado con los modelos SWAN y MSP junto con un gráfico que muestra cómo varía la altura de ola ( $H_s$ ) a lo largo del canal.

Según la teoría, tanto para el caso 1 como para el caso 2 se esperaría ver una propagación del oleaje similar a la de la Figura 40 a), puesto que la dirección del oleaje en estos casos forma  $0^\circ$  con el canal. Esto quiere decir, que las ondas se deberían refractar desde el centro del canal, lo que conduce a una concentración de la energía de las olas a ambos lados fuera del canal (aumenta la altura de ola) y a una reducida energía del oleaje dentro del canal (disminuye la altura de ola).

Con la propagación que realiza el modelo SWAN se puede ver la reducción de la energía del oleaje dentro del canal, ya que disminuye la altura de ola, pero no se ve un aumento de la energía del oleaje a ambos lados fuera del canal (no se ve que aumente la altura de ola). Sin embargo, la propagación que realiza el modelo MSP si muestra el aumento de la energía del oleaje a ambos lados fuera del canal.

Figura 42. Caso 2:  $Dir=270^\circ$  ( $0^\circ$ ),  $T=14s$



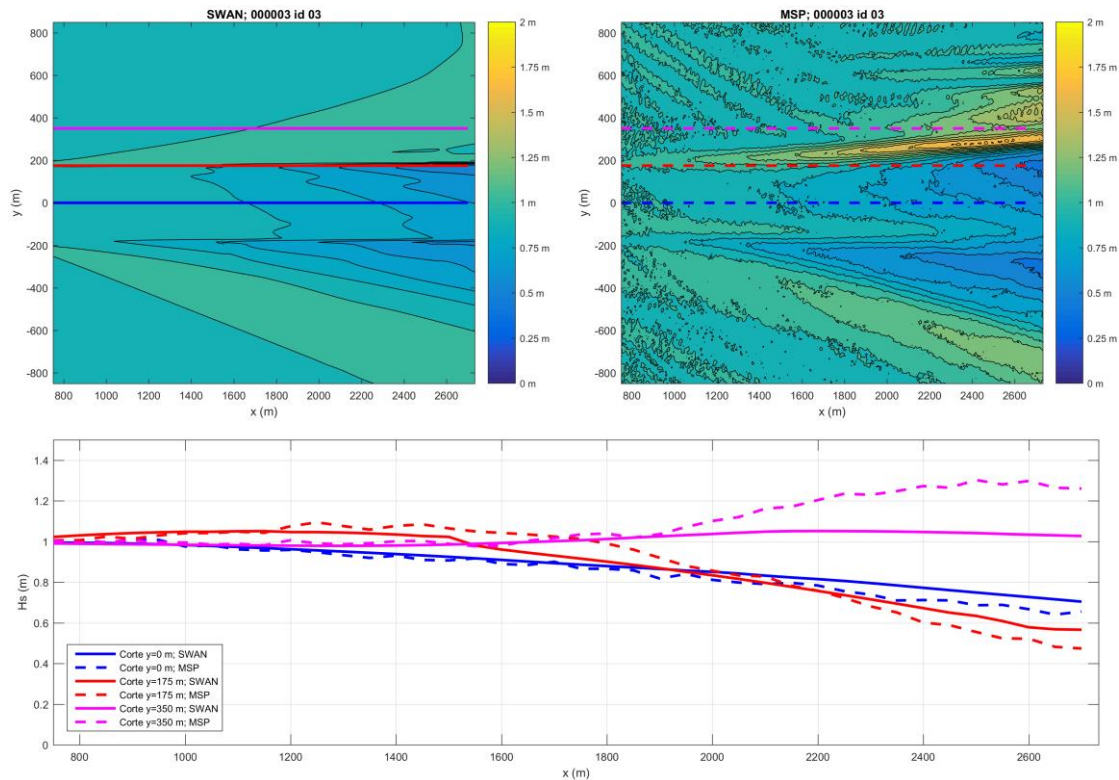
Fuente: Elaboración Propia

Al comparar el caso 1 con el caso 2, se observa que períodos de onda más largos conducen a una disminución en la penetración de energía de onda en el canal, es decir, que con un periodo más pequeño, en el canal hay mayores alturas de ola que con periodos más grandes. Por tanto, con la orientación del canal alineada con la dirección de onda media incidente, parece que períodos de onda más cortos causarían una mayor penetración de la onda de energía en el puerto. Además, la altura de ola a ambos lados del canal es bastante mayor cuanto mayor es el periodo del oleaje.



#### 4.5.2.2. Resultados para tipo b) Olas propagándose bajo un ángulo menor que el crítico

Figura 43. Caso 3: Dir=285° (15°), T=7s

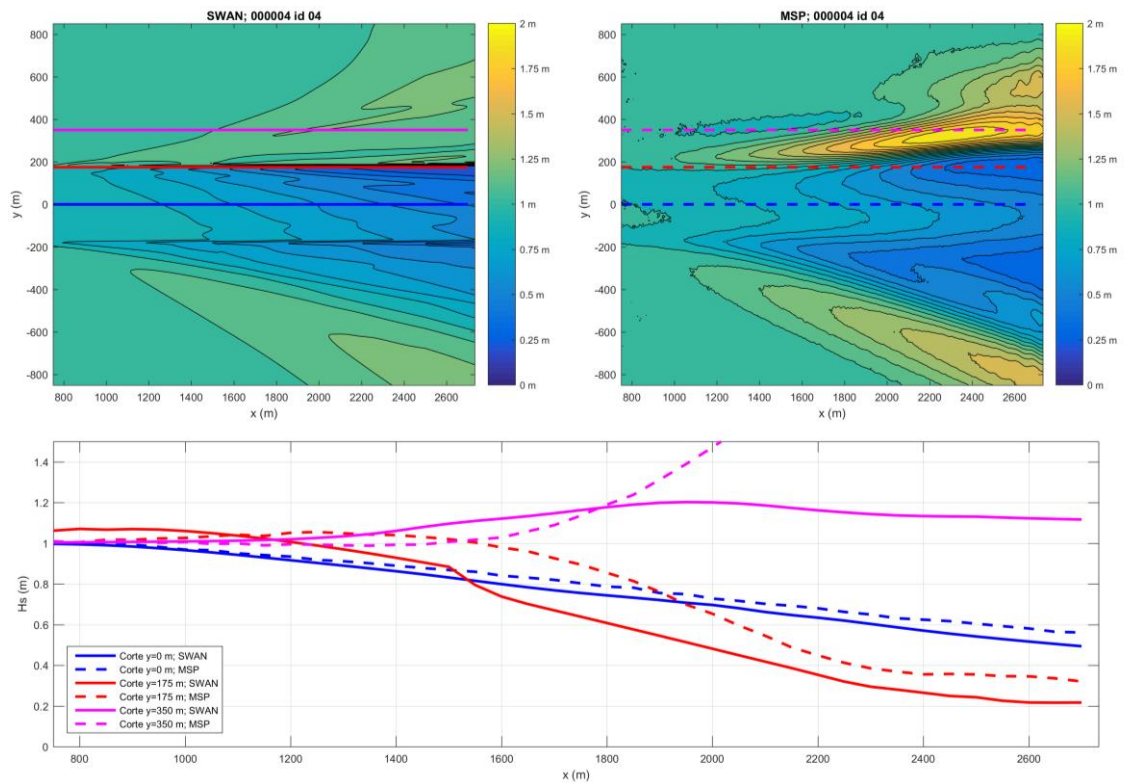


Fuente: Elaboración Propia

Según lo comentado en la teoría, tanto para el caso 3 como para el caso 4 se esperaría ver una propagación del oleaje similar a la de la Figura 40 b), puesto que la dirección del oleaje en estos casos forma 15° con el canal. Esto quiere decir, que las ondas se reflejarían en la pendiente del canal, lo que conduciría a la concentración de la energía de las olas en el lado antes del canal (aumenta la altura de ola) y a una reducida energía del oleaje dentro del canal y al otro lado del canal (disminuye la altura de ola).

Con la propagación que realiza el modelo SWAN se puede ver la reducción de la energía del oleaje dentro del canal y al otro lado del canal, ya que disminuye la altura de ola, pero no se ve una concentración de la energía del oleaje en el lado antes del canal (no se ve que aumente la altura de ola). Sin embargo, la propagación que realiza el modelo MSP si muestra la concentración de la energía del oleaje en el lado antes del canal.

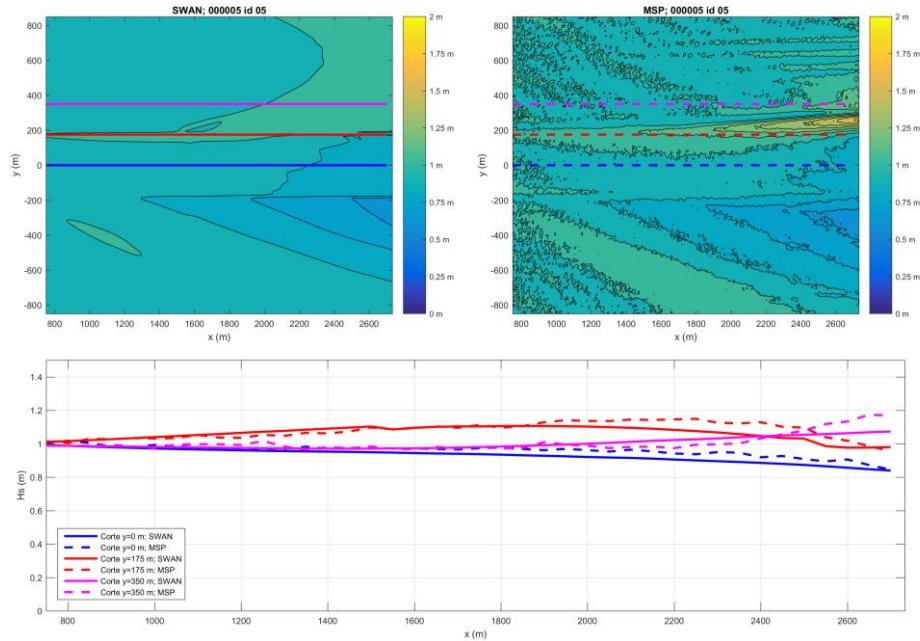
Figura 44. Caso 4:  $Dir=285^\circ$  ( $15^\circ$ ),  $T=14s$



Fuente: Elaboración Propia

Al comparar los casos 3 y 4, se observa que con períodos de onda más grandes se producen mayores cambios en la propagación del oleaje. Por un lado, la disminución de altura de ola dentro y al otro lado del canal es mayor en el caso 4 que en el caso 3 y por otro, el aumento de la altura de ola en el lado antes del canal también es mayor en el caso 4.

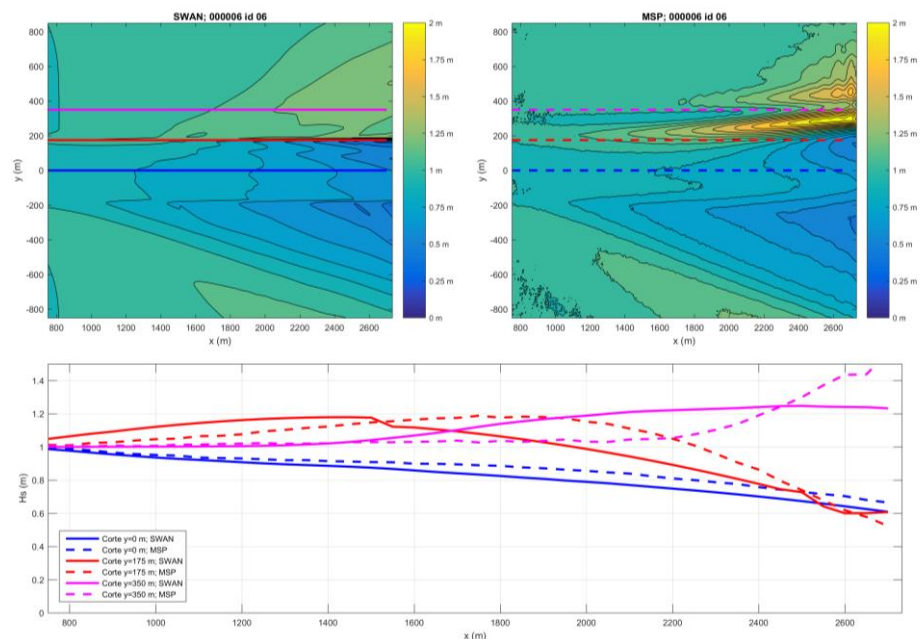
Figura 45. Caso 5: Dir=300° (30°), T=7s



Fuente: Elaboración Propia

Tanto en el caso 5 como en el caso 6 se espera ver también el tipo b), puesto que la dirección del oleaje en estos casos forma 30° con el canal. La diferencia entre los casos 3 y 4 y los casos 5 y 6 reside en que al aumentar la oblicuidad de 15° (casos 3 y 4) a 30° (casos 5 y 6), el resultado son mayores alturas de ola en el canal, según lo observado por Zwamborn y Grieve (1974).

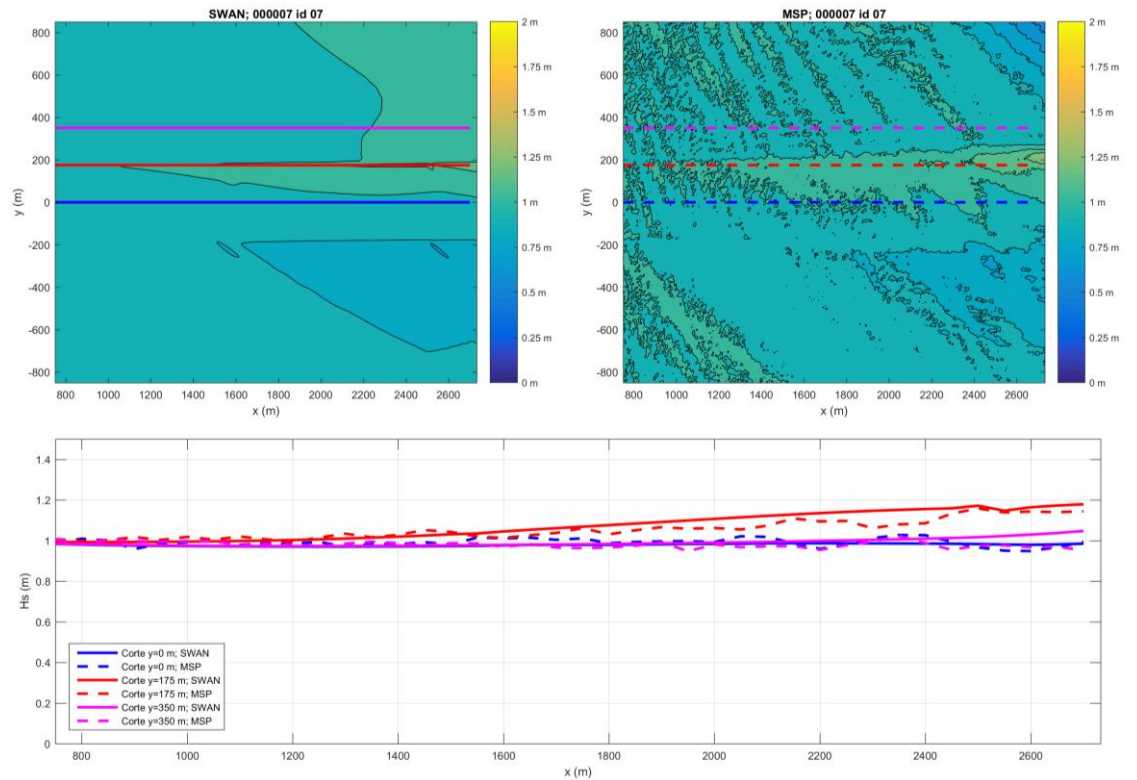
Figura 46. Caso 6: Dir=300° (30°), T=14s



Fuente: Elaboración Propia

#### 4.5.2.3. Resultados para tipo c) Olas propagándose bajo un ángulo mayor que el crítico

Figura 47. Caso 7:  $Dir=315^\circ$  ( $45^\circ$ ),  $T=7s$

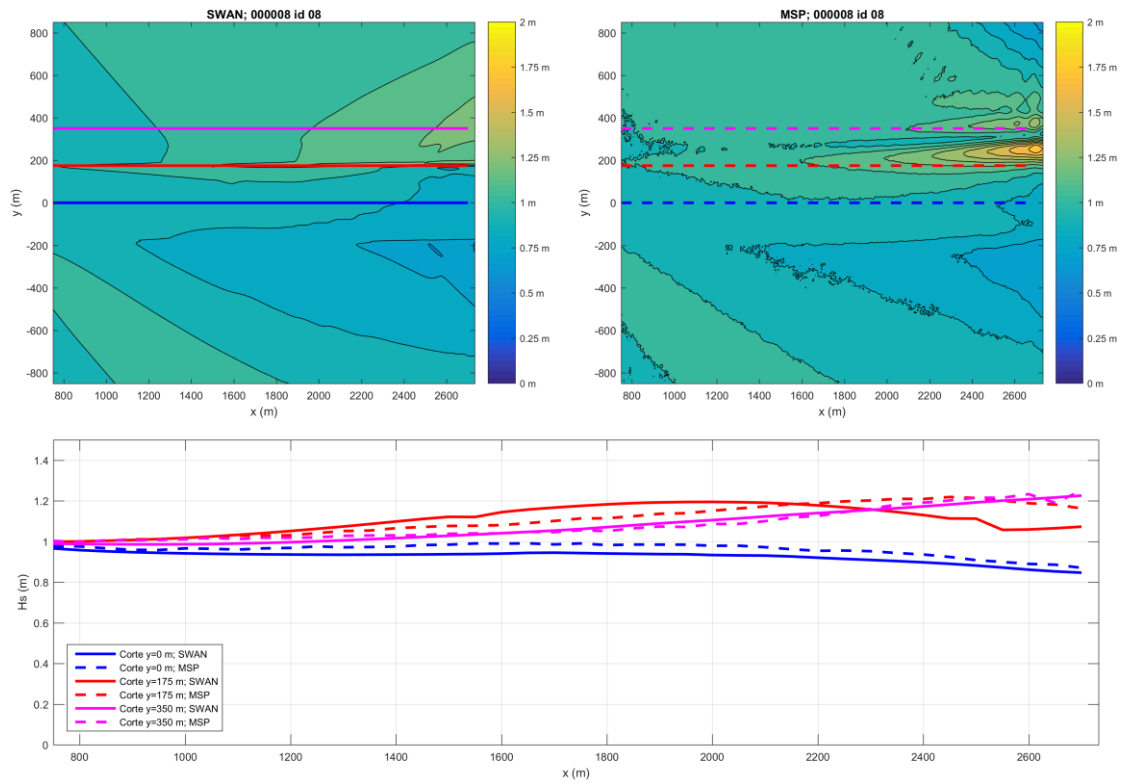


Fuente: Elaboración Propia

Por lo comentado en la teoría, tanto para el caso 7 como para el caso 8 se esperaría ver una propagación del oleaje similar a la de la Figura 40 c), puesto que la dirección del oleaje en estos casos forma  $45^\circ$  con el canal. Esto quiere decir, que las ondas se propagan a través del canal, cruzan el canal sin grandes interrupciones, doblando hacia la derecha (hacia la zona poco profunda) y luego hacia la izquierda (hacia la zona poco profunda).

Con la propagación que realiza el modelo SWAN se puede ver que el oleaje atraviesa el canal, ya que ha aumentado la altura de ola en el canal (confirmando que el aumento de la oblicuidad de  $30^\circ$  a  $45^\circ$  da como resultado mayores alturas de ola en el canal, según lo observado por Zwamborn y Grieve (1974)) y se aprecia una disminución de la altura de ola al otro lado del canal. En este caso, la propagación que realiza el modelo MSP muestra lo mismo que el modelo SWAN.

Figura 48. Caso 8:  $Dir=315^\circ$  ( $45^\circ$ ),  $T=14s$



Fuente: Elaboración Propia

Por otro lado, al comparar los casos 7 y 8 se continúa observando que con períodos de onda más grandes, los cambios que se producen en la propagación del oleaje son mayores.

#### 4.5.2.4. Resumen de resultados

A modo de conclusión, se presenta en la Tabla 9 un resumen comparativo de los casos con canal ejecutados en ambos modelos numéricos.

Tabla 9. Resumen Casos con Canal, SWAN vs MSP

		SWAN								MSP							
		Caso								Caso							
		1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8
a) $\theta \approx 0$	Concentración de la energía del oleaje a ambos lados fuera del canal (aumenta H)	X	X							✓	✓						
	Reducida energía del oleaje dentro del canal (disminuye H)	✓	✓							✓	✓						
b) $\theta \leq \theta_{cr}$	Concentración de la energía del oleaje en el lado antes del canal (aumenta H)			X	X	X	X					✓	✓	✓	✓		
	Reducida energía del oleaje dentro del canal (disminuye H)			✓	✓	✓	✓					✓	✓	✓	✓		
	Reducida energía del oleaje al otro lado del canal (disminuye H)			✓	✓	✓	✓					✓	✓	✓	✓		
c) $\theta > \theta_{cr}$	Las ondas atraviesan el canal							✓	✓							✓	✓

Fuente: Elaboración Propia

A través de esta tabla resumen, se puede ver que mientras que el SWAN no muestra todos los procesos esperados, el MSP sí lo hace. Por tanto, el MSP propaga mejor el oleaje bajo estas circunstancias batimétricas.



#### 4.6. Conclusiones generales del experimento teórico

En esta fase se ha llevado a cabo un estudio teórico del impacto del oleaje en los canales de navegación. El estudio se centra en la propagación del oleaje sobre este canal, en los procesos físicos involucrados y en su representación en los modelos numéricos de propagación del oleaje.

El estudio teórico considera un canal trapezoidal con una anchura en el fondo de 350 m y una profundidad de 20 m. El talud en los laterales del canal es 1V:1H y la pendiente de la batimetría es 1:200. La profundidad mínima en el dominio es de 10 m.

La sensibilidad de la respuesta del canal al forzamiento de la onda incidente se probó simulando períodos de onda de 7 y 14 s y direcciones de onda medias de 0°, 15°, 30° y 45°, con una altura de ola fija de 1 m ( $H_s=1\text{m}$ ).

Tras el análisis, se puede concluir que el modelo SWAN resuelve muy bien el asomeramiento, la refracción y la propagación del oleaje, pero resuelve mal la difracción. Sin embargo, el modelo MSP resuelve muy bien la difracción, lo que provoca la mejora que se observa en la Tabla 9, que mientras que el SWAN no muestra todos los procesos esperados, el MSP sí lo hace.

Además, gracias a la comparación de ambos modelos se puede decir que SWAN generalmente subestima las condiciones del oleaje. Esto lleva a pensar que la exclusión de la difracción en el modelado en SWAN puede llevar a esta subestimación de la energía del oleaje.

Finalmente, los resultados obtenidos son coherentes con la teoría y estudios previos y además verificaron que los parámetros de onda más relevantes en la interacción onda – canal de navegación, son la dirección de la onda y el período de onda.



## 5. FASE B: CASO REAL

La Fase B consiste en la obtención del clima marítimo a pie de dique para un caso real, de forma que con esa altura de ola en la situación con canal y sin canal para ambos modelos numéricos SWAN y MSP, se pueda obtener el tamaño de las piezas del dique en ambas situaciones.

### 5.1. Introducción

En esta fase B se utilizará el caso de un puerto real en las situaciones con canal y sin canal para ver la influencia de éste en la propagación del oleaje. Se demostrará que el canal afecta a la propagación del oleaje en este caso real, es decir, que el canal influye en la propagación, y se tratarán de cuantificar los cambios mediante la obtención del tamaño de las piezas del dique con el clima marítimo a pie de dique en ambas situaciones (con y sin canal).

Además, se demostrará que con cada modelo se obtienen distintos resultados, ya que, tal como se mencionó en el caso teórico, no propaga de la misma forma el SWAN que el MSP.

Finalmente, se discutirá el efecto que tiene el canal en el diseño del dique, comparando los distintos tamaños de piezas obtenidos.

### 5.2. Descripción de la zona de estudio

El puerto objeto de estudio se encuentra localizado en la República de Ghana, país del oeste de África.

*Figura 49. Localización de la República de Ghana*

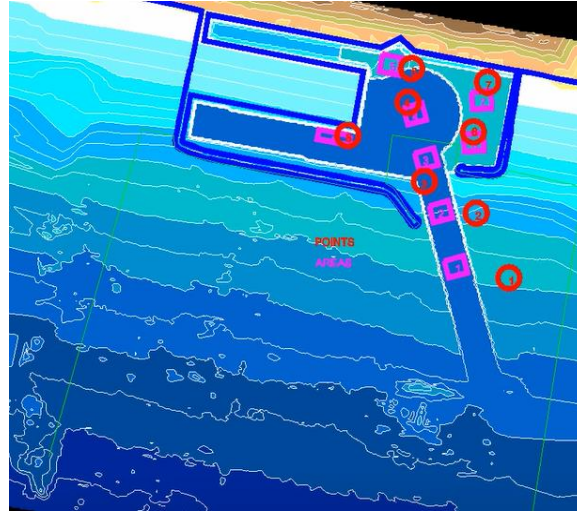


*Fuente: Google imágenes*

Se trata de un puerto comercial de uso general, abierto a todo tipo de tráficos, con zonas de almacenamiento u operación de mercancías no peligrosas o pasajeros adosadas al dique.

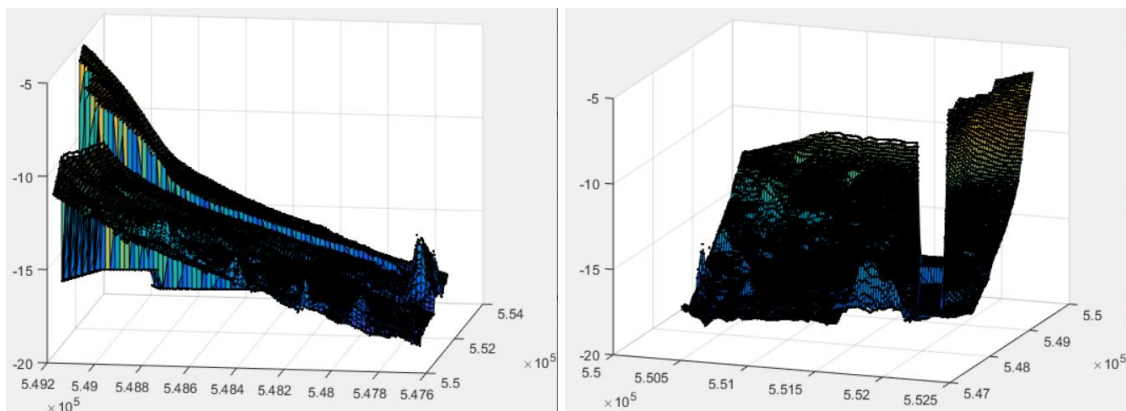
Para mejorar la navegación de los barcos en la entrada al puerto se realizó el dragado de un canal de navegación. La batimetría y la zona del puerto con canal se muestra en las siguientes figuras.

Figura 50. Batimetría y zona del puerto con canal



Fuente: Elaboración Propia

Figura 51. Batimetría con canal

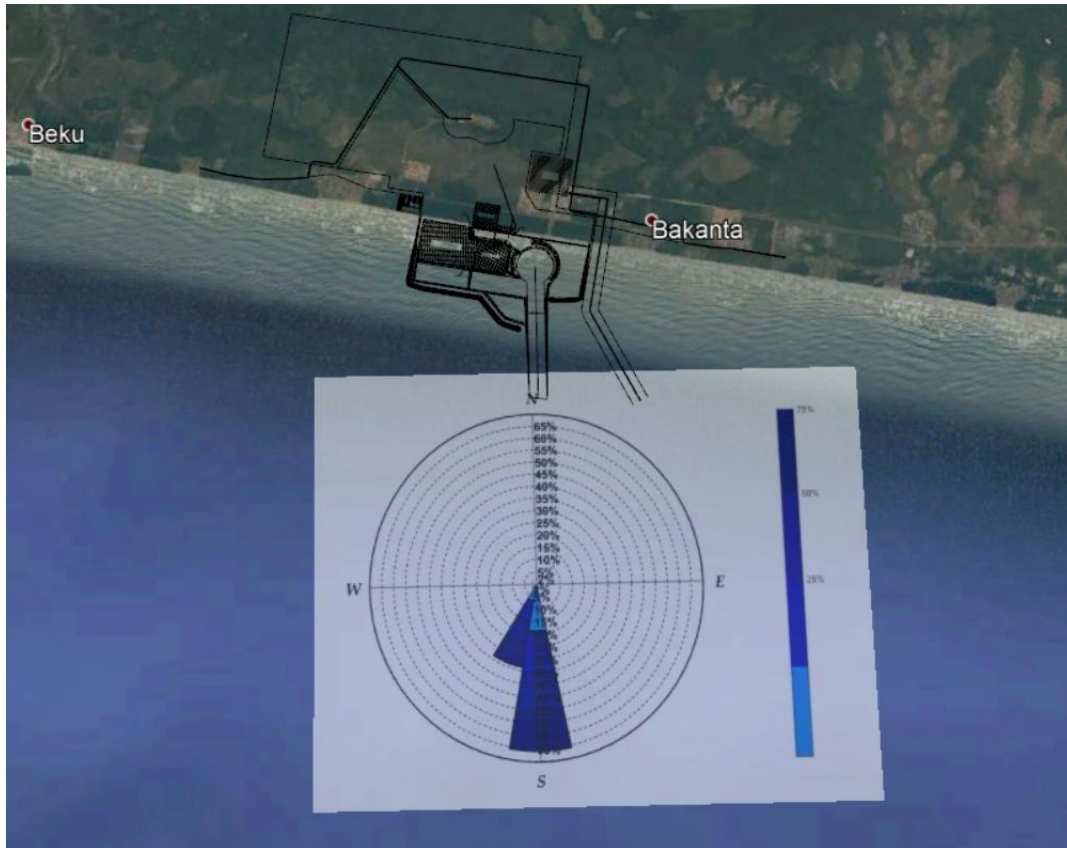


Fuente: Elaboración Propia

Como se puede ver en la Figura 51, la batimetría no es regular, presenta una serie de elevaciones a la izquierda justo al lado del canal de navegación. Además, la zona de entrada al puerto inmediatamente a la derecha del canal se encuentra a una menor profundidad que la zona de la izquierda.

El puerto se encuentra orientado hacia el sur, zona desde la cual procede el oleaje en el 65,94% de los casos. El resto del oleaje procede mayoritariamente del suroeste (33,70%), como se muestra en la figura siguiente.

Figura 52. Puerto objeto de estudio



Fuente: Elaboración Propia

Respecto al clima marítimo, se dispone de datos GOW (Global Ocean Waves). El conjunto de datos del GOW está previsto que se actualice periódicamente y se basa en la calibración de un modelo hindcast con datos de altimetría de satélite, tras su verificación con datos históricos. Los valores atípicos debidos a los ciclones tropicales (no simulados debido a la insuficiente resolución en el forzamiento del viento) se identifican y no se tienen en cuenta en el proceso de corrección de las alturas de las olas simuladas con los datos del altímetro. Los resultados se validan con las mediciones de los satélites en el tiempo y en el espacio. Esta nueva base de datos calibrada representa adecuadamente las características del clima de olas desde 1948 y pretende ser el conjunto de datos de olas más largo y actualizado para el análisis de la variabilidad del clima de olas a nivel mundial, así como para muchas aplicaciones de la ingeniería costera (Reguero et al., 2012).

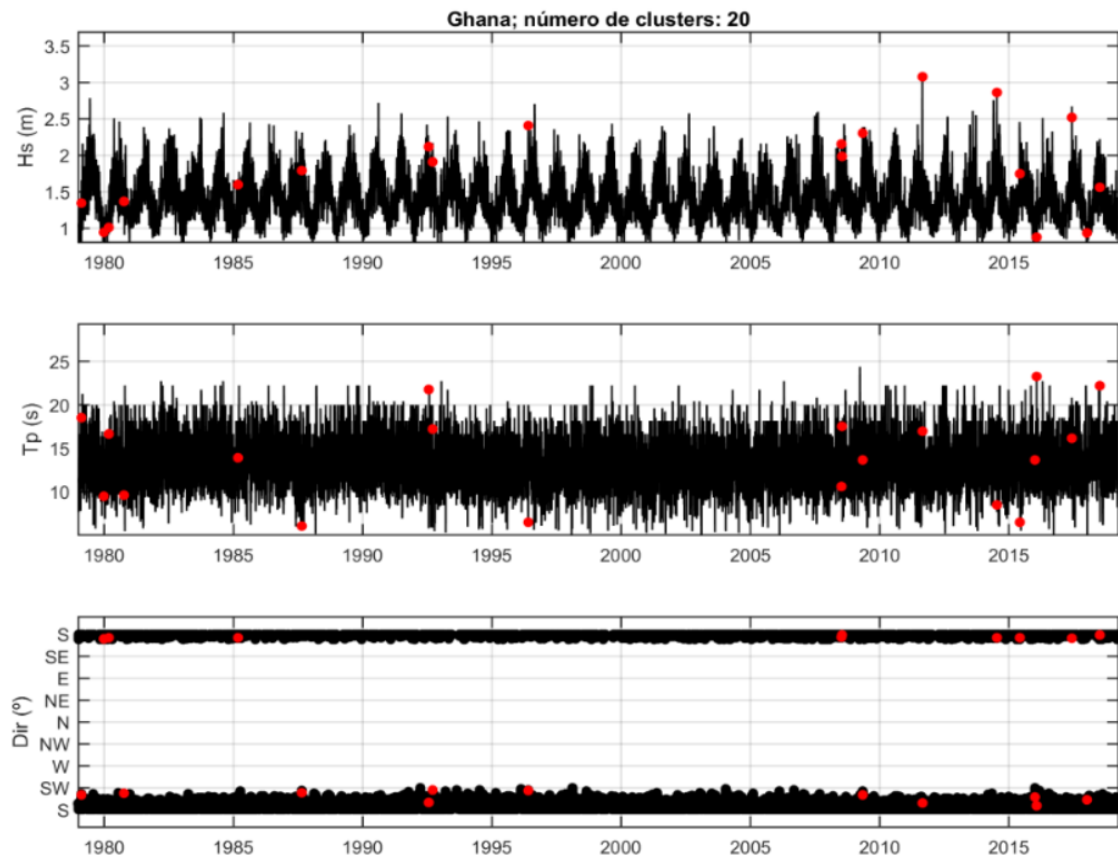
### 5.3. Metodología

Se cuenta con la serie histórica (hindcast) de oleaje, y se desea trasladar esta serie a cualquier punto en la zona costera o frente a la bocana del puerto, teniendo en cuenta la batimetría real. No se tendrá en cuenta el nivel del mar (se considerará un nivel de marea constante).

Al tratarse de una serie histórica de larga duración, es computacionalmente inviable ejecutar todas y cada una de las horas consecutivas incluidas en la base de datos de oleaje, por ello se recomienda emplear la técnica de “downscaling híbrido” (Camus et al., 2013), que consiste en seleccionar un número N de estados de mar representativos del clima marítimo y propagarlos numéricamente. En este caso, se considerarán 20 estados de mar (N=20).

Para realizar esta tarea de auto-selección de los 20 estados de mar con base en la serie completa de oleaje en Ghana y la posterior interpolación de la serie en los puntos de control seleccionados, se emplea el programa “IH\_MaxDiss.exe”.

Figura 53. 20 estados de mar seleccionados por el programa IH\_MaxDiss.exe



Fuente: Elaboración Propia

Como se puede ver en la Figura 53, los N=20 casos pre-seleccionados a priori no parecen suficientes para caracterizar adecuadamente el clima marítimo dentro de la técnica de “downscaling híbrido” (que recomienda alrededor de 200 casos). No obstante, para el presente TFM se tomó la decisión de realizar un número reducido de casos que pudiese representar una casuística media de estados de mar representativos pero que al mismo tiempo no llegara a suponer un problema en tiempos computacionales, especialmente considerando el calendario

disponible para la realización del presente trabajo. Además, y al tratarse de un análisis comparativo entre modelos, se considera que los 20 casos son una buena aproximación al problema. Finalmente, el oleaje en la zona de estudio muestra una dirección de propagación media anual bastante constante (ver Tabla 11), lo cual invita a pensar que un número reducido de casos N no es una estrategia errónea.

Una vez seleccionados los 20 estados de mar representativos del clima marítimo en Ghana, la propagación del oleaje se lleva a cabo con los modelos numéricos SWAN y MSP, que requieren ser alimentados con las características horarias de oleaje (Hs, Tp y Dir).

Se ejecutarán los 20 casos para la situación sin y con canal en los modelos SWAN y MSP, como se muestra en la Tabla 10.

*Tabla 10. Escenarios de ejecución, caso real.*

Modelo/Geometría	Sin canal	Con canal
SWAN	Escenario 1, 20 casos	Escenario 2, 20 casos
MSP	Escenario 3, 20 casos	Escenario 4, 20 casos

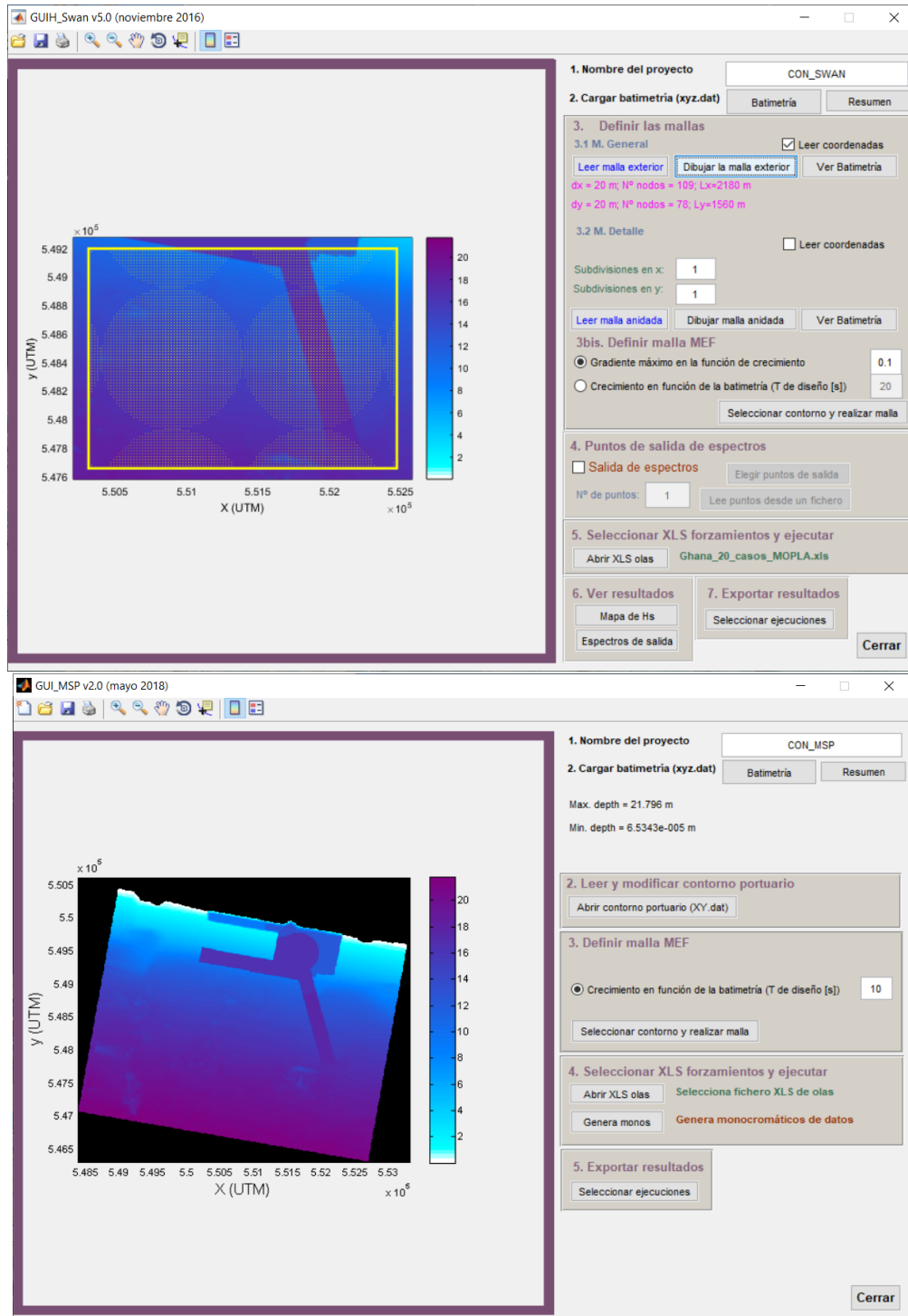
*Fuente: Elaboración Propia*

Para la ejecución de estos modelos, disponiendo de la batimetría real en Ghana con y sin canal, el primer paso es definir las mallas de propagación del oleaje. Para que la comparación de resultados sea lo más justa posible, ambas mallas SWAN y MSP tienen que ser iguales: no estructuradas triangulares.

Puesto que el canal está orientado al sur y la mayoría del oleaje procede del sur S (65,94%) o del suroeste SSW (33,70%) como se muestra en la Figura 52, el contorno para SWAN y MSP se definirá por 4 puntos formando una malla rectangular, como se muestra en la Figura 55.

Para el modelo MSP no se va a considerar reflexión, los 3 contornos serán abiertos sin reflexión.

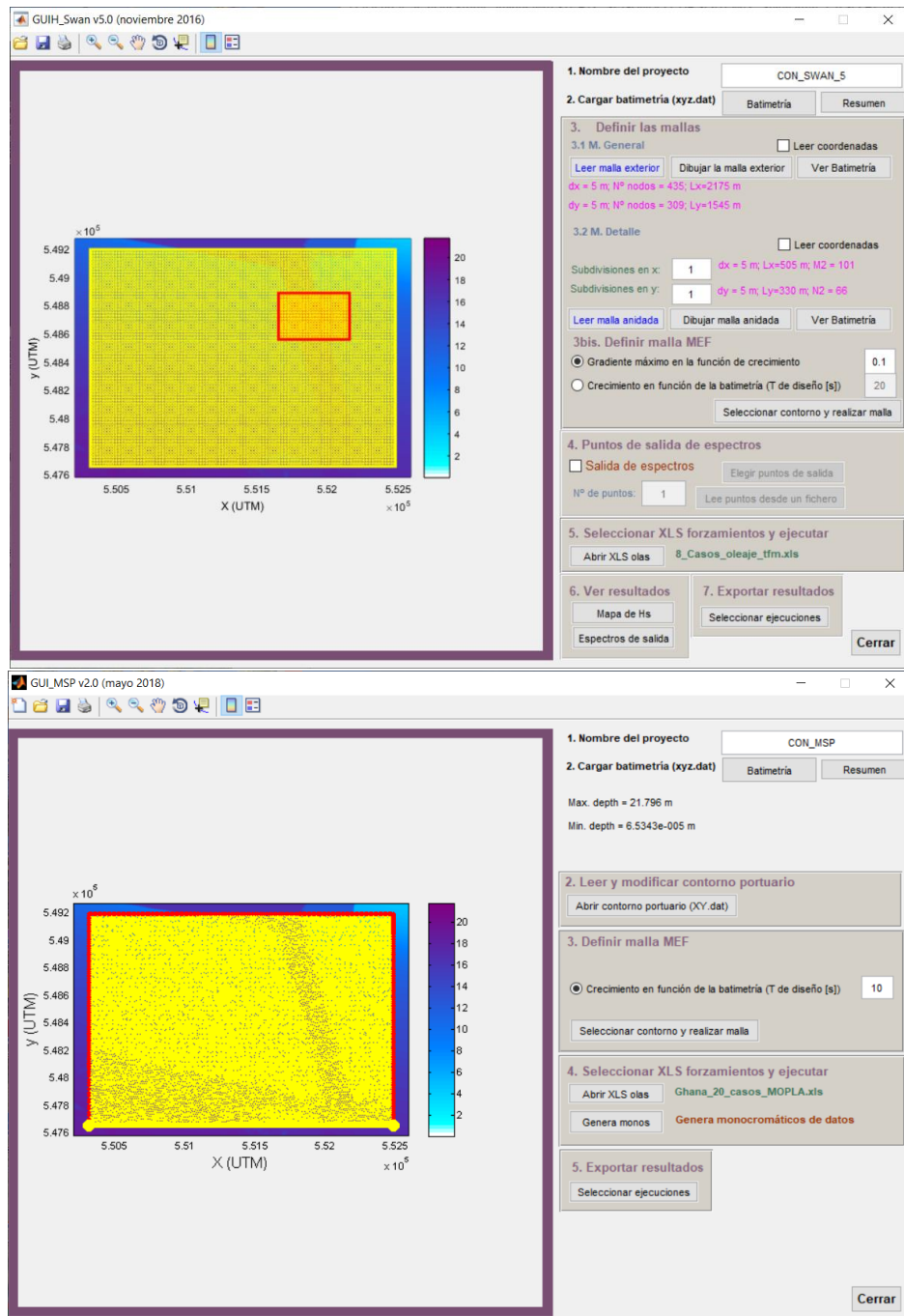
Figura 54. Modelos SWAN y MSP, batimetría con canal en el caso real



Fuente: Elaboración Propia



Figura 55. Contornos SWAN y MSP en el caso real



Fuente: Elaboración Propia



## 5.4. Resultados

De los 20 casos ejecutados con los modelos numéricos SWAN y MSP (mostrados en la Tabla 11), se seleccionan 6 casos. El criterio de selección de estos 6 casos es el porcentaje de ocurrencia en la estadística total del oleaje resultante de la selección con el algoritmo MaxDiss.

Tabla 11. 20 casos ejecutados

CASO	H (m)	T (s)	Dir	Gamma	Sigma	ID	Ángulo que forma con canal $\theta$ (°)	Porcentaje ocurrencia (%)
<b>1</b>	<b>0,946</b>	<b>9,52</b>	<b>170,51</b>	<b>3,3</b>	<b>20</b>	<b>id_01</b>	<b><math>\approx 0</math></b>	<b>21</b>
2	2,52	16,13	171,81	10	10	id_02		0
3	2,862	8,47	172,81	10	10	id_03		0
<b>4</b>	<b>1,008</b>	<b>16,67</b>	<b>172,90</b>	<b>3,3</b>	<b>20</b>	<b>id_04</b>	<b><math>\approx 0</math></b>	<b>7</b>
<b>5</b>	<b>1,598</b>	<b>13,89</b>	<b>173,11</b>	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>id_05</b>	<b><math>\approx 0</math></b>	<b>42</b>
6	1,75	6,49	173,61	10	10	id_06		1
7	2,154	10,64	174,20	10	10	id_07		2
8	1,558	22,22	178,30	10	10	id_08		0
<b>9</b>	<b>1,984</b>	<b>17,54</b>	<b>178,51</b>	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>id_09</b>	<b><math>\approx 0</math></b>	<b>4</b>
10	0,874	23,25	188,30	3,3	20	id_0A		0
11	3,076	16,95	193,41	10	10	id_0B		0
12	2,122	21,74	195,10	10	10	id_0C		0
13	0,936	4,55	200,31	3,3	20	id_0D		0
14	0,692	13,70	205,50	3,3	20	id_0E		4
<b>15</b>	<b>1,346</b>	<b>18,52</b>	<b>209,90</b>	<b>3,3</b>	<b>20</b>	<b>id_0F</b>	<b><math>\approx 30</math></b>	<b>4</b>
16	2,304	13,70	210,91	10	10	id_0G		1
<b>17</b>	<b>1,37</b>	<b>9,62</b>	<b>213,61</b>	<b>3,3</b>	<b>20</b>	<b>id_0H</b>	<b><math>\approx 30</math></b>	<b>12</b>
18	1,79	6,06	214,81	10	10	id_0I		0
19	2,406	6,53	219,51	10	10	id_0J		0
20	1,912	17,24	220,21	10	10	id_0K		1

Fuente: Elaboración Propia

Como se puede ver en la Tabla 11, por ejemplo, el primer oleaje (caso 1) tiene una frecuencia de ocurrencia de 21%. Esto quiere decir, que el 21% de las horas del año medio está actuando el oleaje del caso 1. Además, el oleaje con mayor probabilidad de ocurrencia es el 5 (caso 5), que prácticamente tiene la mitad (el 42% del tiempo).

Por tanto, los 6 casos que se seleccionarán son el 5, 1, 17, 4, 9 y 15, ya que son aquellos que realmente imperan en la estadística del oleaje, cuya suma representa el 89%. Estos casos se muestran en la Tabla 12, ordenados de mayor a menor porcentaje de ocurrencia.

Tabla 12. 6 casos seleccionados

CASO	H (m)	T (s)	Dir	Gamma	Sigma	ID	Ángulo que forma con canal $\theta$ (°)	Porcentaje ocurrencia (%)
5	1,598	13,89	173,11	10	10	id_05	$\approx 0$	42
1	0,946	9,52	170,51	3,3	20	id_01	$\approx 0$	21
17	1,37	9,62	213,61	3,3	20	id_0H	$\approx 30$	12
4	1,008	16,67	172,90	3,3	20	id_04	$\approx 0$	7
9	1,984	17,54	178,51	10	10	id_09	$\approx 0$	4
15	1,346	18,52	209,90	3,3	20	id_0F	$\approx 30$	4
TOTAL								89

Fuente: Elaboración Propia

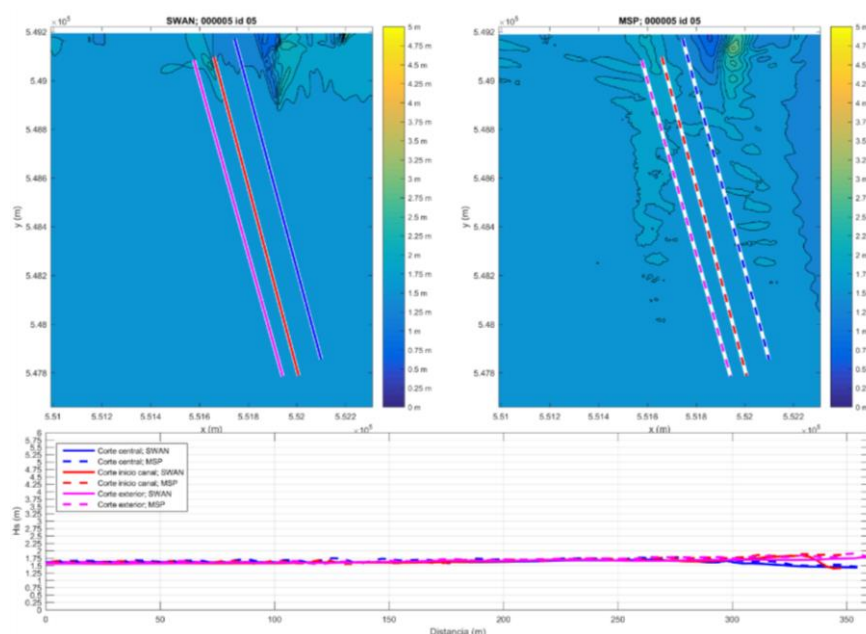
En los siguientes apartados se muestran mapas comparativos de los resultados de estos 6 casos seleccionados para ambos modelos (SWAN y MSP) con y sin canal.

#### 5.4.1. Resultados comparativos sin canal

El objetivo de la comparación de los resultados sin canal en los modelos SWAN y MSP en este caso real, es verificar que ambos modelos realizan correctamente la propagación del oleaje y que la realizan de forma similar.

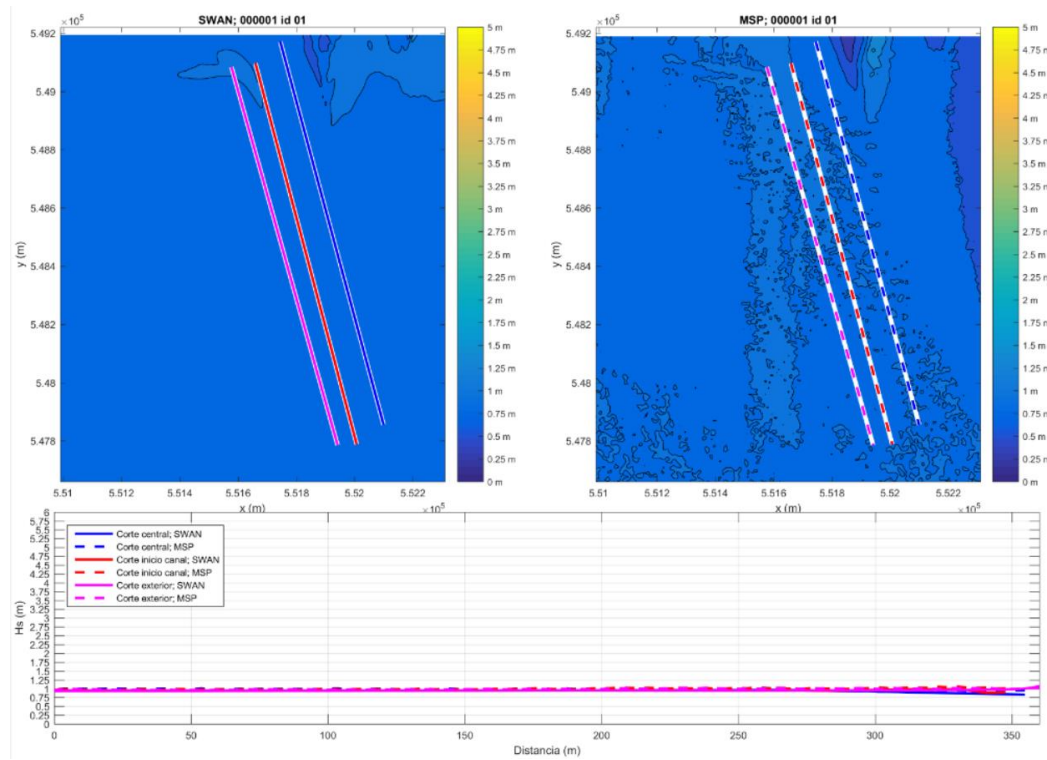
Con la batimetría real de la zona de Ghana ambos modelos van a tener que resolver procesos de propagación del oleaje, principalmente asomeramiento y refracción (reflexión no, porque no se ha considerado). Por tanto, en principio la física a resolver por ambos modelos es la misma, aunque los resultados puedan diferir debido a las hipótesis de montaje entre modelos.

Figura 56. Caso 5: Porcentaje de ocurrencia 42%, sin canal SWAN vs MSP.



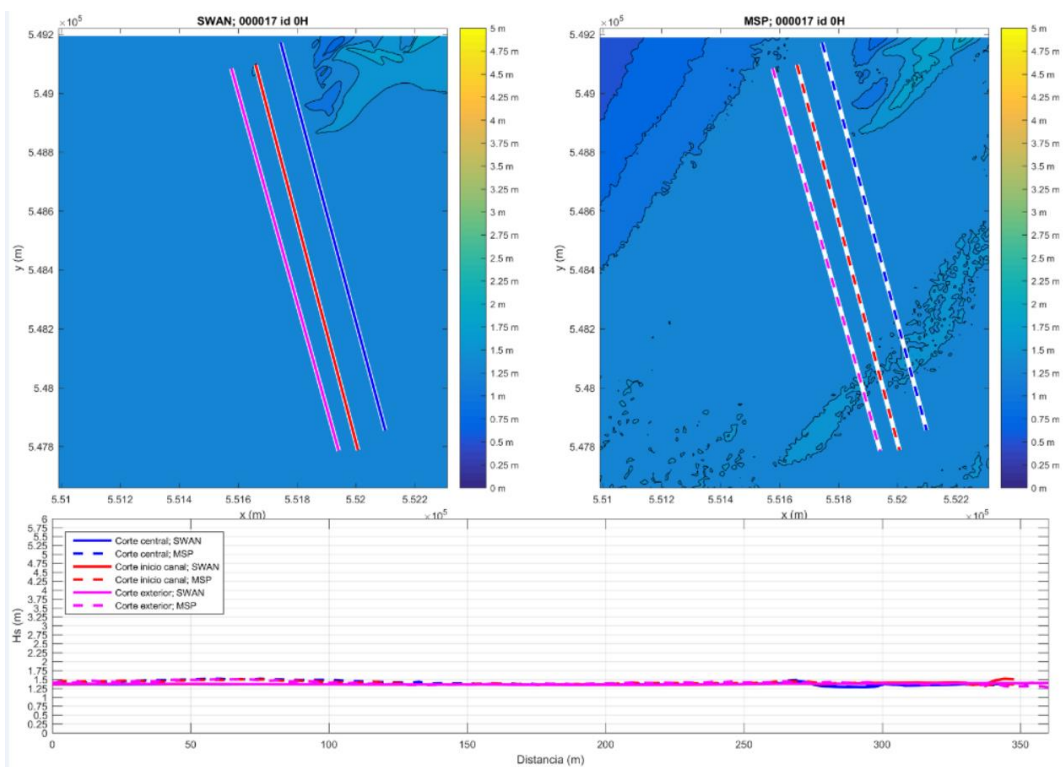
Fuente: Elaboración Propia

Figura 57. Caso 1: Porcentaje de ocurrencia 21%, sin canal SWAN vs MSP.



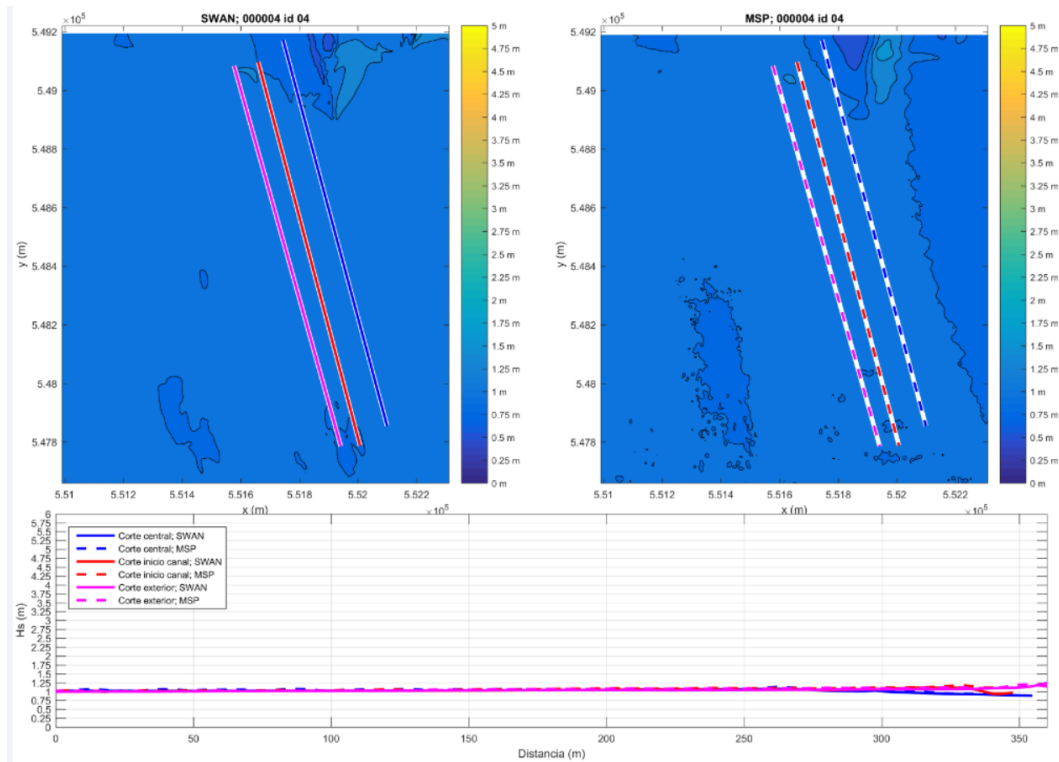
Fuente: Elaboración Propia

Figura 58. Caso 17: Porcentaje de ocurrencia 12%, sin canal SWAN vs MSP.



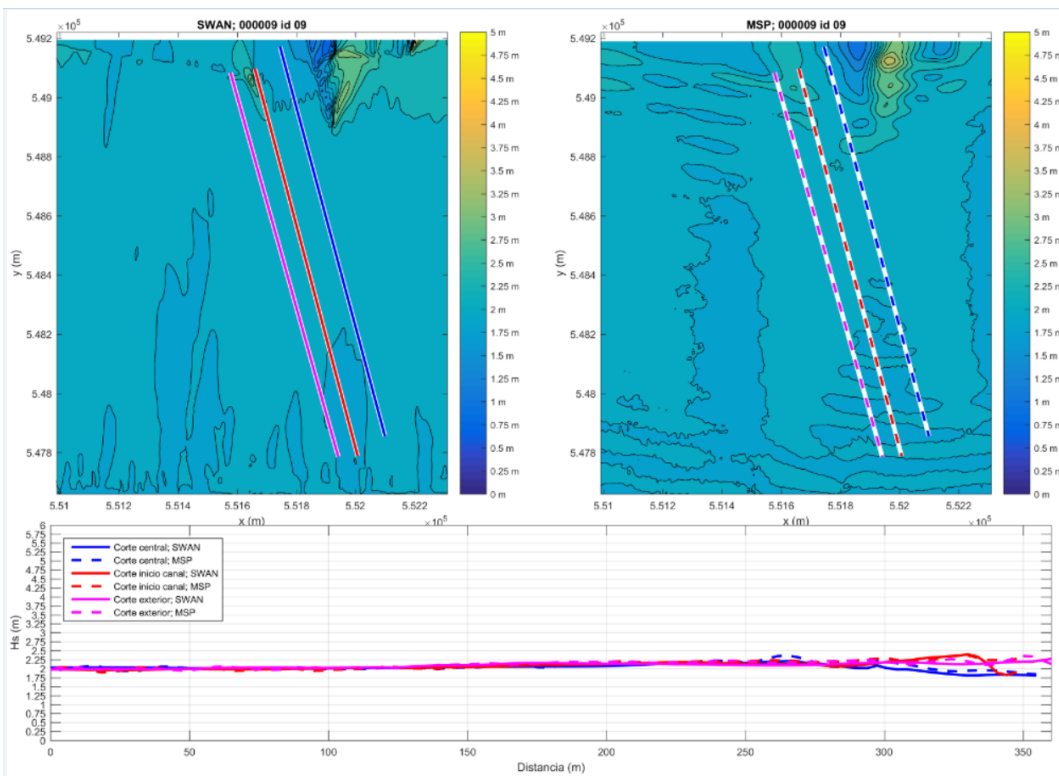
Fuente: Elaboración Propia

Figura 59. Caso 4: Porcentaje de ocurrencia 7%, sin canal SWAN vs MSP.



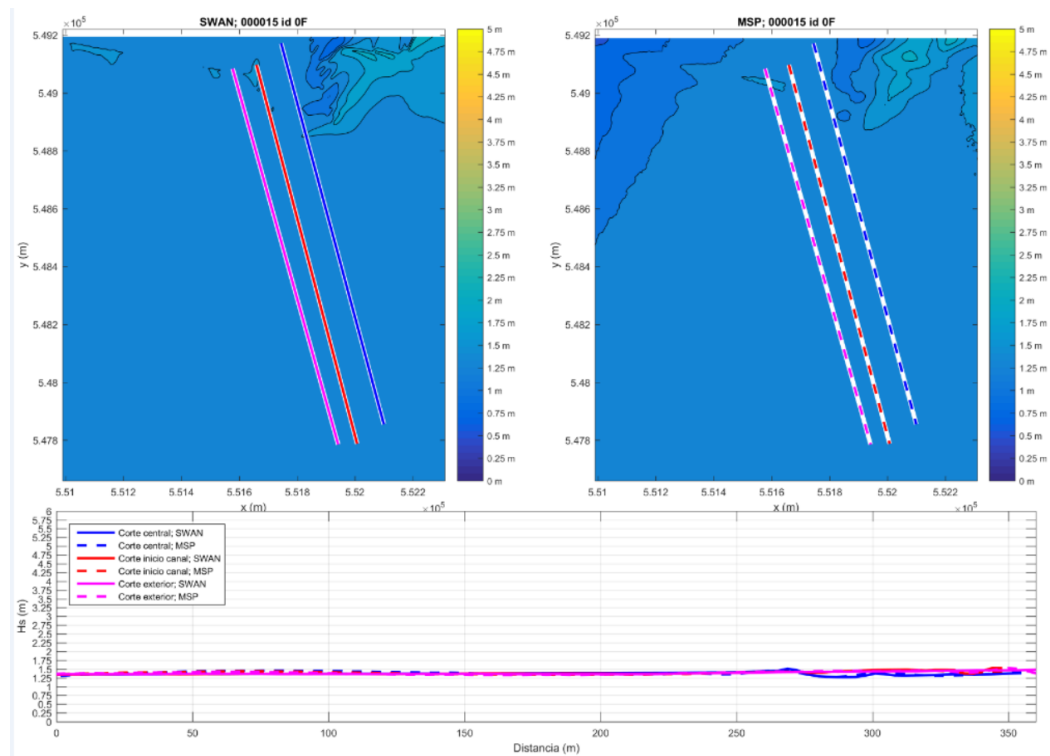
Fuente: Elaboración Propia

Figura 60. Caso 9: Porcentaje de ocurrencia 4%, sin canal SWAN vs MSP.



Fuente: Elaboración Propia

Figura 61. Caso 15: Porcentaje de ocurrencia 4%, sin canal SWAN vs MSP.



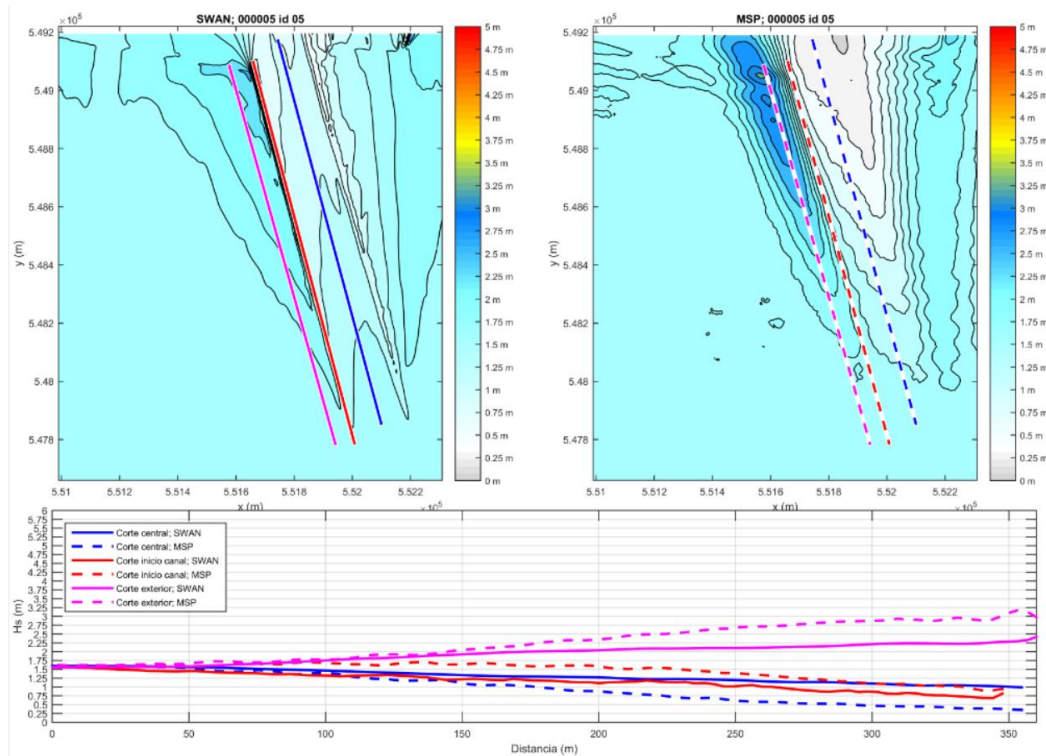
*Fuente: Elaboración Propia*

En estas imágenes sin canal se puede observar tanto para el caso del SWAN como para el caso del MSP, procesos de propagación del oleaje como asomeramiento, ya que al aproximarse a la costa y disminuir la profundidad aumenta la altura de ola, y refracción, cuando el oleaje incide oblicuamente sobre la costa y encuentra un cambio de profundidad, se produce un giro en el frente del oleaje.

Por otro lado, viendo los cortes longitudinales de altura de ola a lo largo de la localización donde estaría el canal, se puede observar que el corte del SWAN y del MSP son iguales, ya que prácticamente se superponen, por lo que se demuestra que ambos modelos están haciendo lo mismo y esto significa que las comparaciones que se muestran a continuación son numéricamente justas y fundamentadas.

## 5.4.2. Resultados comparativos con canal

Figura 62. Caso 5: Porcentaje de ocurrencia 42%, con canal SWAN vs MSP.



Fuente: Elaboración Propia

El caso 5 mostrado en la Figura 62, es el que tiene mayor probabilidad de ocurrencia. En esta figura aparece la comparación de los resultados obtenidos con los modelos SWAN y MSP junto con un gráfico que muestra cómo varía la altura de ola ( $H_s$ ) a lo largo del canal.

El caso 5 se caracteriza por tener una altura de oleaje alta ( $H_s=1,598$  m), un periodo alto ( $T_p=13,89$  s) y una dirección del oleaje que forma con el eje del canal un ángulo aproximadamente igual a cero. Además, Gamma y Sigma tienen un valor de 10. En el caso de gamma esto quiere decir que toda la energía está muy cercana al periodo de pico (un oleaje muy swell, muy regular), y en el caso de sigma quiere decir que la dispersión direccional es de  $\pm 10^\circ$ .

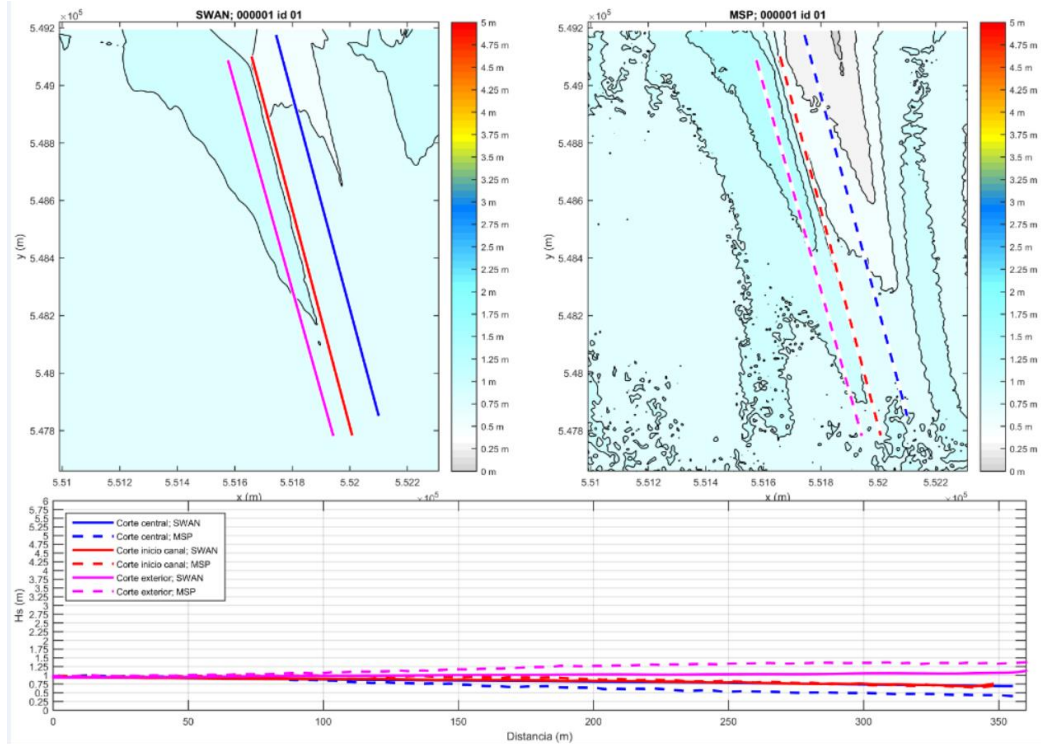
Puesto que el oleaje se propaga aproximadamente en la dirección del eje del canal, según la teoría se esperaría ver una propagación del oleaje similar a la de la Figura 40 a). Las ondas se deberían refractar desde el centro del canal, lo que conduce a una concentración de la energía de las olas a ambos lados fuera del canal (aumenta la altura de ola) y a una reducida energía del oleaje dentro del canal (disminuye la altura de ola).

Con la propagación que realiza el modelo SWAN se puede ver la reducción de la energía del oleaje dentro del canal, ya que disminuye la altura de ola, pero no tanto como en el caso del MSP. Además, con el modelo MSP se ve mucho más aumento de la energía del oleaje a ambos lados fuera del canal (sobre todo en el lado izquierdo). Sin embargo, con el SWAN no se aprecia tanto aumento de la energía (sobre todo en el lado izquierdo).



Por tanto, con esta dirección del oleaje que se propaga a lo largo de la alineación del eje del canal, el puerto de Ghana (situado en el extremo del canal de navegación) experimentará una menor perturbación producida por el oleaje (Zwamborn y Grieve 1974, Sarker et al 2008).

Figura 63. Caso 1: Porcentaje de ocurrencia 21%, con canal SWAN vs MSP.



Fuente: Elaboración Propia

El caso 1 se caracteriza por tener una altura de ola baja ( $H_s=0,946$ ), un periodo bajo ( $T=9,52$  s) y una dirección del oleaje que forma con el eje el canal un ángulo aproximadamente igual a cero. Además,  $\gamma$  tiene un valor de 3,3 (lo que significa que se reparte mucho la energía a lo largo de toda la frecuencia) y  $\sigma$  de 20 (la dispersión direccional es de  $\pm 20^\circ$ ).

Según la teoría, se esperaría ver una propagación del oleaje similar a la de la Figura 40 a), puesto que al igual que en el caso 5, la dirección del oleaje forma aproximadamente  $0^\circ$  con el canal.

La diferencia del caso 1 con el 5, es la menor altura de ola y periodo. En el caso del periodo, como se mencionó en teoría, cortos periodos de oleaje como en este caso, son menos afectados por la refracción que largos periodos de oleaje.

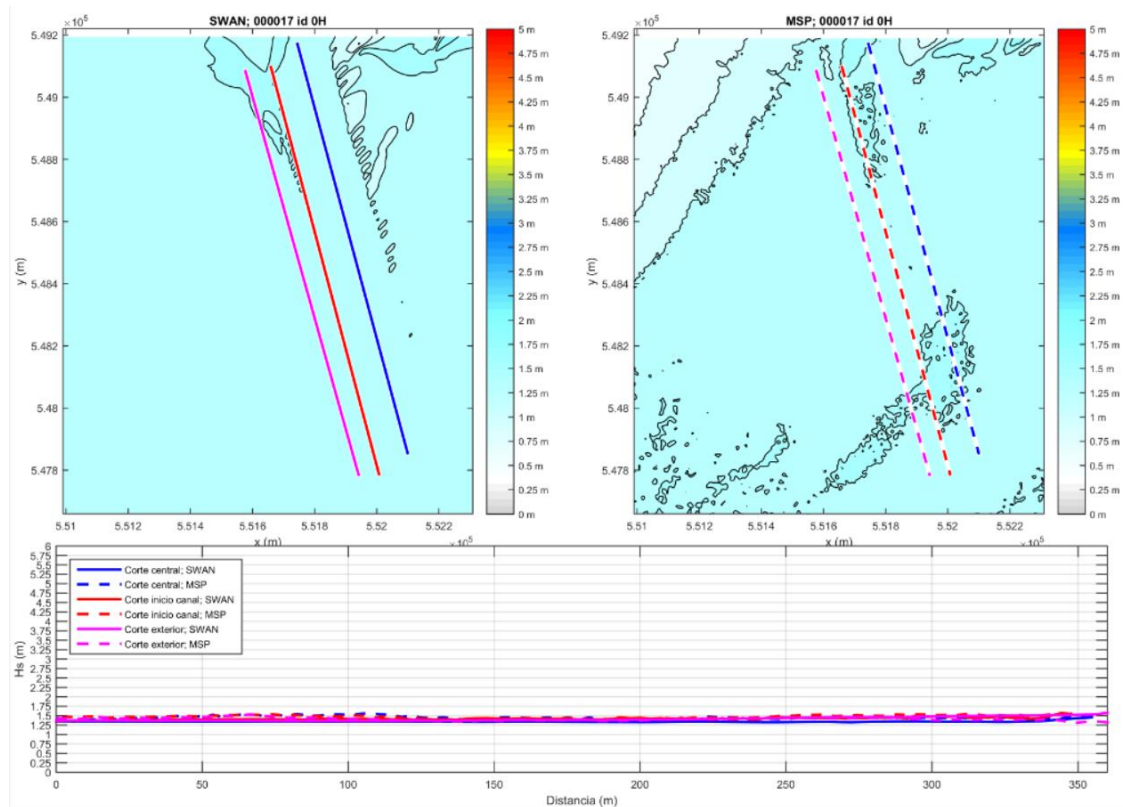
Tabla 13. Caso 1 vs Caso 5

CASO	$H_s$ (m)	$T_p$ (s)	Dir	Gamma	Sigma
5	1,598	13,89	173,11	10	10
1	0,946	9,52	170,51	3,3	20

Fuente: Elaboración Propia



Figura 64. Caso 17: Porcentaje de ocurrencia 12%, con canal SWAN vs MSP.



Fuente: Elaboración Propia

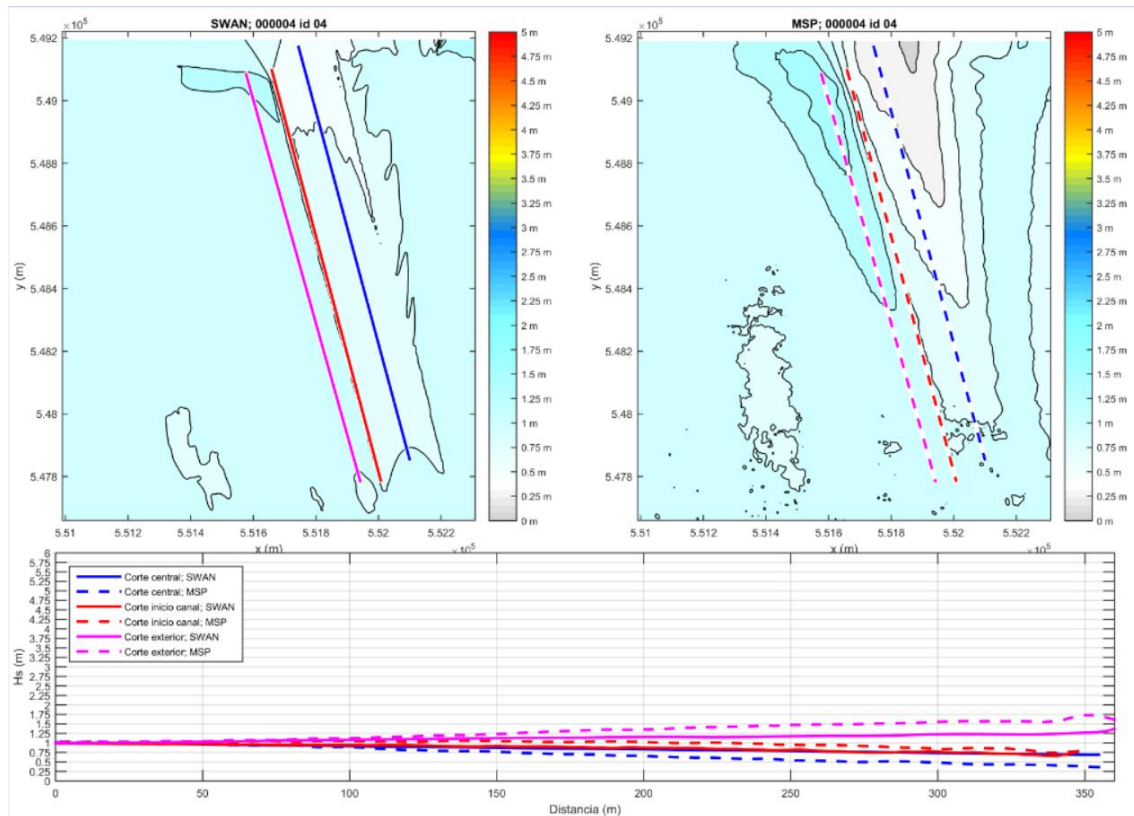
El caso 17 se caracteriza por tener una altura de oleaje alta ( $H_s=1,37$ ), un periodo bajo ( $T_p=9,62$  s) y una dirección del oleaje que forma con el eje el canal un ángulo aproximadamente igual a  $30^\circ$ . Gamma tiene un valor de 3,3 y sigma de 20.

En este caso se puede ver una propagación del oleaje similar a la de la Figura 40 c), olas propagándose bajo un ángulo mayor que el crítico, es decir, que las ondas se propagan a través del canal, cruzan el canal sin grandes interrupciones, doblando hacia la derecha (hacia la zona poco profunda) y luego hacia la izquierda (hacia la zona poco profunda).

Con la propagación que realiza el modelo SWAN se puede ver que el oleaje atraviesa el canal, ya que ha aumentado un poco la altura de ola en el canal y disminuye la altura de ola al otro lado del canal. En este caso, la propagación que realiza el modelo MSP muestra también que el oleaje cruza el canal sin grandes interrupciones.

En este caso, en la entrada del puerto hay una altura de ola mayor que en los casos 1 y 5, por lo que puede conducir a una mayor actividad del oleaje en el puerto.

Figura 65. Caso 4: Porcentaje de ocurrencia 7%, con canal SWAN vs MSP.



Fuente: Elaboración Propia

El caso 4 se caracteriza por tener una altura de oleaje baja ( $H_s=1,008$ ), un periodo alto ( $T_p=16,67$  s) y una dirección del oleaje que forma con el eje el canal un ángulo aproximadamente igual a cero. Gamma tiene un valor de 3,3 y Sigma de 20.

Este caso es prácticamente igual al caso 1, con la diferencia de que el periodo es mayor (en el caso 1 el periodo era 9,52 s)

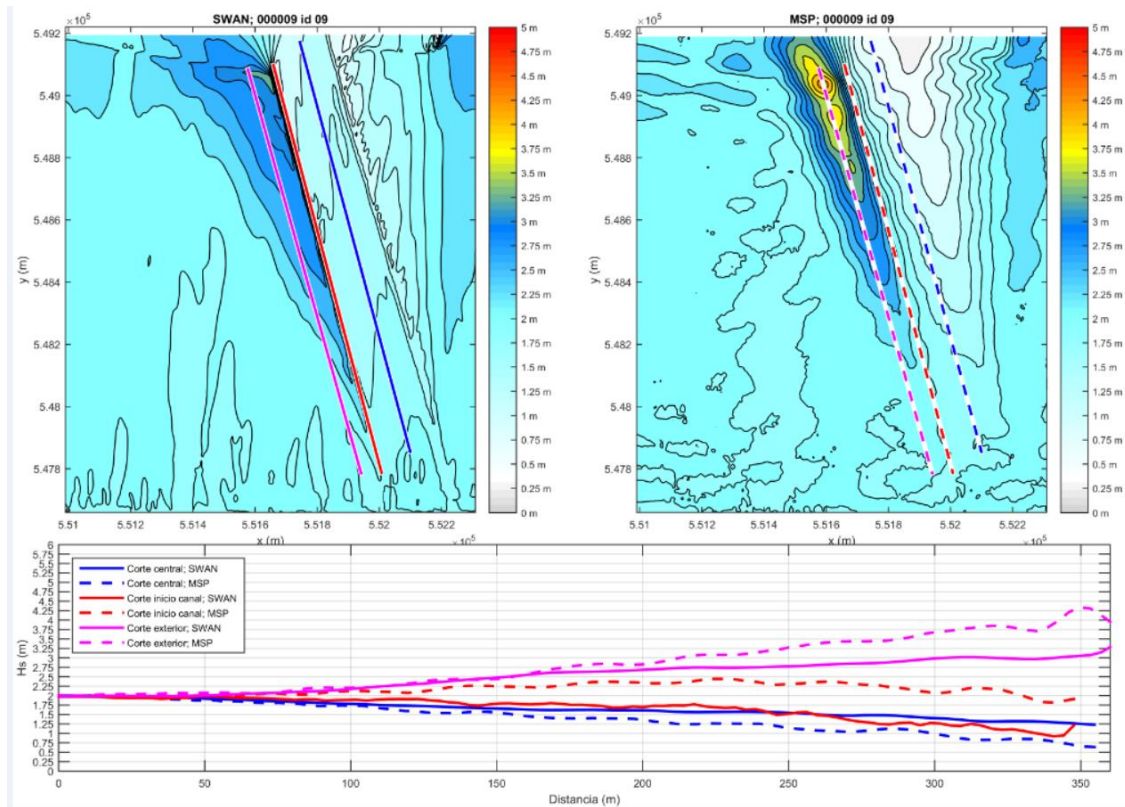
Como se ha mencionado en otros casos, cortos periodos de oleaje son menos afectados por la refracción que largos periodos de oleaje.

Tabla 14. Caso 4 vs Caso 1

CASO	$H_s$ (m)	$T_p$ (s)	Dir	Gamma	Sigma
1	0,946	9,52	170,51	3,3	20
4	1,008	16,67	172,90	3,3	20

Fuente: Elaboración Propia

Figura 66. Caso 9: Porcentaje de ocurrencia 4%, con canal SWAN vs MSP.



Fuente: Elaboración Propia

El caso 9 se caracteriza por tener una altura de ola alta ( $H_s=1,984$ ), un periodo alto ( $T=17,54$  s) y una dirección del oleaje que forma con el eje el canal un ángulo aproximadamente igual a cero. Gamma y Sigma tienen un valor de 10.

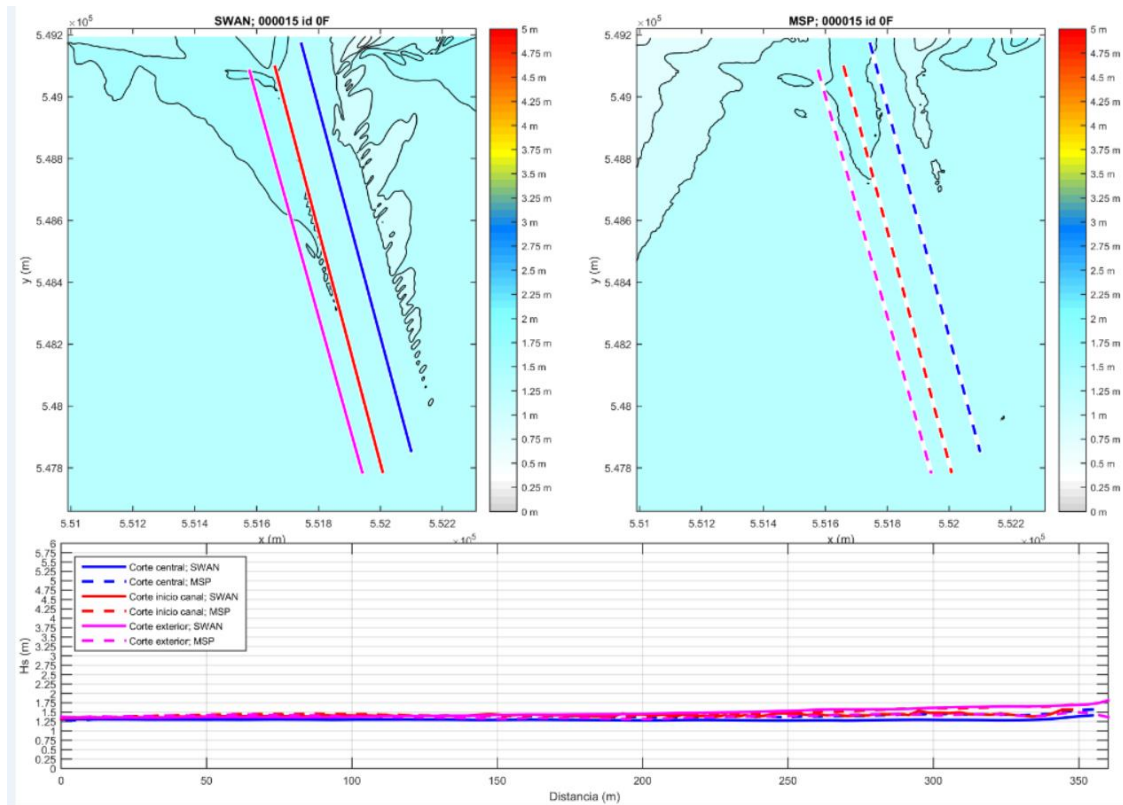
Este caso es prácticamente igual que el caso 5, únicamente la altura de ola, el periodo y la dirección es un poco mayor.

Tabla 15. Caso 9 vs Caso 5

CASO	Hs (m)	Tp (s)	Dir	Gamma	Sigma
5	1,598	13,89	173,11	10	10
9	1,984	17,54	178,51	10	10

Fuente: Elaboración Propia

Figura 67. Caso 15: Porcentaje de ocurrencia 4%, con canal SWAN vs MSP.



Fuente: Elaboración Propia

El caso 15 se caracteriza por tener una altura de oleaje baja ( $H_s=1,346$ ), un periodo alto ( $T=18,52$  s) y una dirección del oleaje que forma con el eje el canal un ángulo aproximadamente igual a  $30^\circ$ . Gamma tiene un valor de 3,3 y Sigma de 20.

En este caso se puede ver, al igual que en el caso 17, una propagación del oleaje similar a la de la Figura 40 c), es decir, que las ondas se propagan a través del canal, cruzan el canal sin grandes interrupciones, doblando hacia la derecha (hacia la zona poco profunda) y luego hacia la izquierda (hacia la zona poco profunda).

Apenas hay diferencias entre las figuras del caso 17 y 15, lo único que cambia es que en el caso 17 el periodo del oleaje era bajo ( $T=9,62$  s) y en el caso 15 es alto, y cortos periodos del oleaje son menos afectados por la refracción que largos periodos de oleaje.

Tabla 16. Caso 15 vs Caso 17

CASO	$H_s$ (m)	$T_p$ (s)	Dir	Gamma	Sigma
17	1,37	9,62	213,61	3,3	20
15	1,346	18,52	209,90	3,3	20

Fuente: Elaboración Propia

### 5.5. Series en los puntos de control

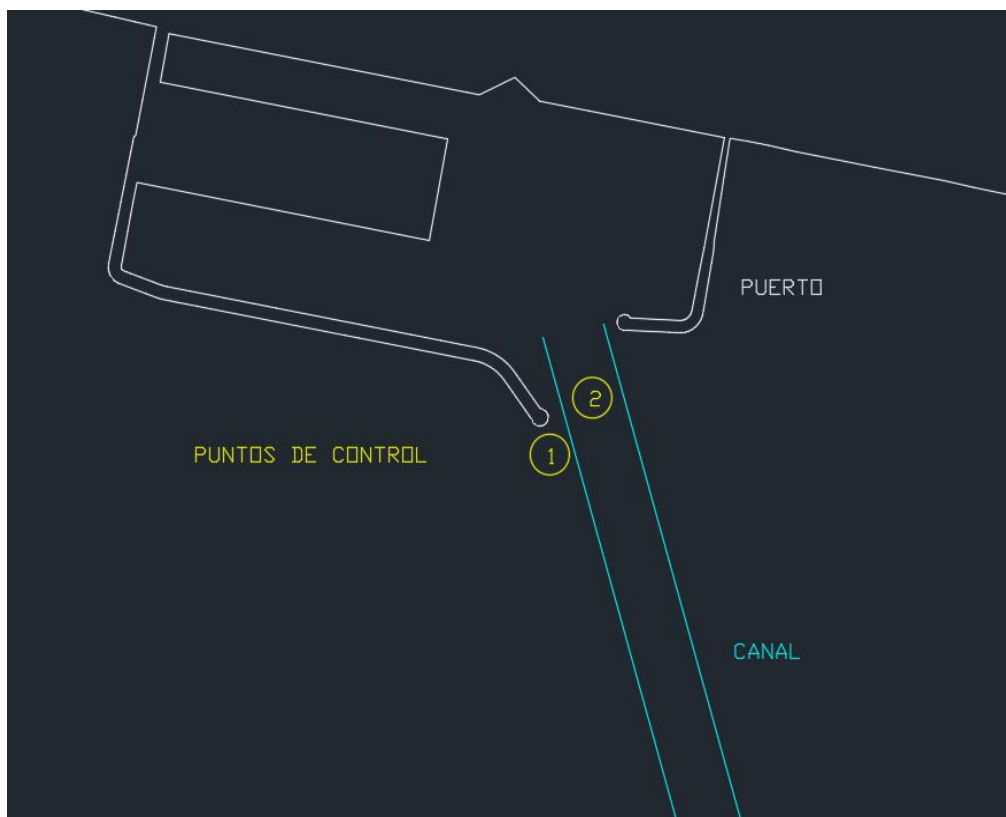
En este apartado se presentan las series de oleaje en dos puntos de control (ver Figura 68). Estos dos puntos son importantes para comprobar que se producen cambios en la altura de ola por la presencia del canal, y son los siguientes:

- Punto de control 1: Frente al morro del dique
- Punto de control 2: En el centro del canal

En el punto de control 1 se estudia el régimen extremal (obtenido con la formulación GEV). El régimen extremal de un parámetro de estado de mar en un periodo de tiempo es la distribución del valor máximo de dicho parámetro en el periodo de tiempo indicado. Con el periodo de retorno correspondiente se entra en el régimen extremal y se obtiene la altura de ola significativa ( $H_s$ ) para calcular el peso de hormigón para el dique necesario en cada caso (SWAN y MSP con y sin canal).

En el punto de control 2 se estudia la agitación, por lo que se comparan los regímenes medios en cada caso (SWAN y MSP con y sin canal). El régimen medio de un parámetro de estado de mar en un periodo de tiempo es la distribución del parámetro de estado de mar en ese periodo de tiempo.

*Figura 68. Puntos de control*

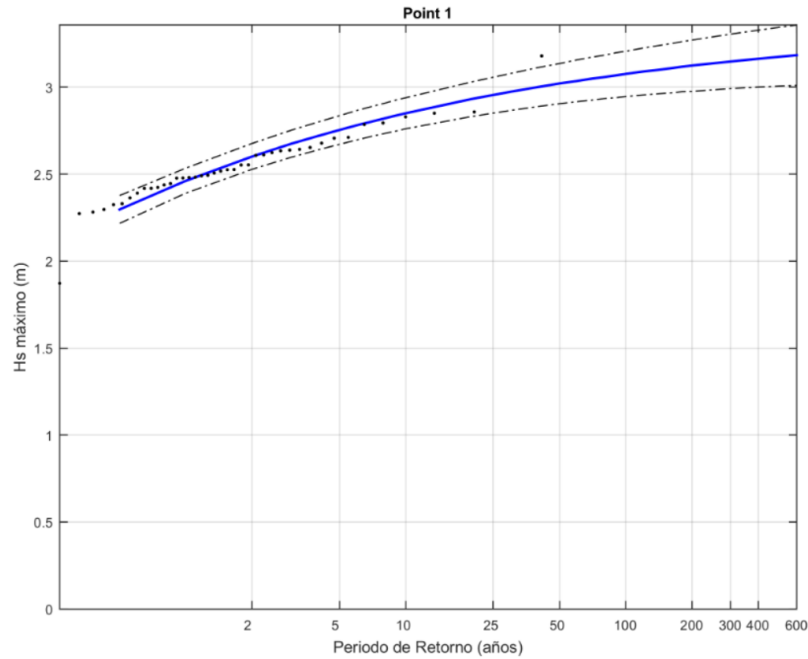


*Fuente: Elaboración Propia*

### 5.5.1. Punto de control 1: Morro

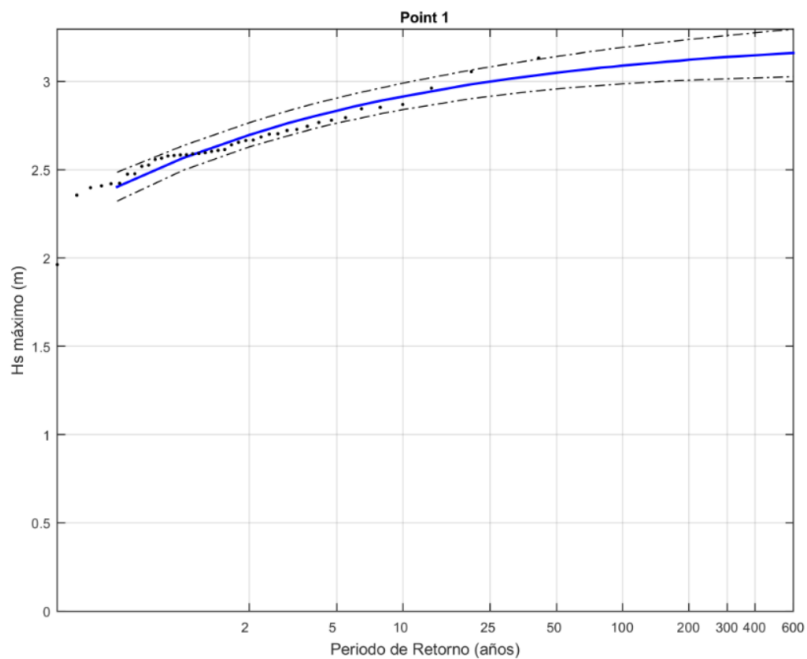
Los regímenes extremales obtenidos en el punto 1 son los mostrados en las figuras siguientes.

*Figura 69. Régimen Extremal, Caso SWAN sin canal.*



*Fuente: Elaboración Propia*

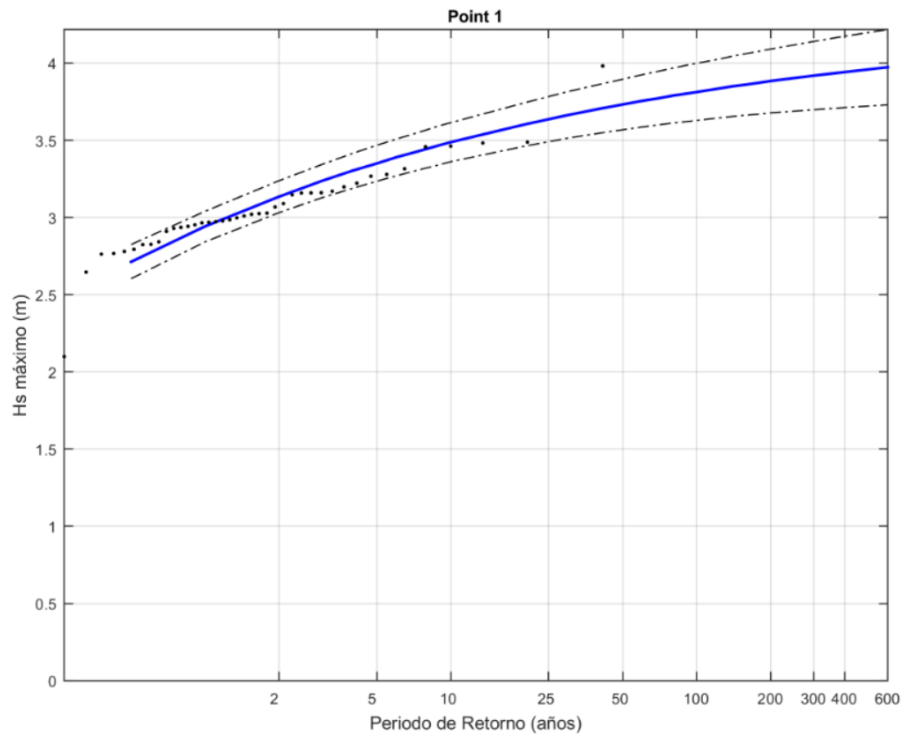
*Figura 70. Régimen Extremal, Caso MSP sin canal.*



*Fuente: Elaboración Propia*

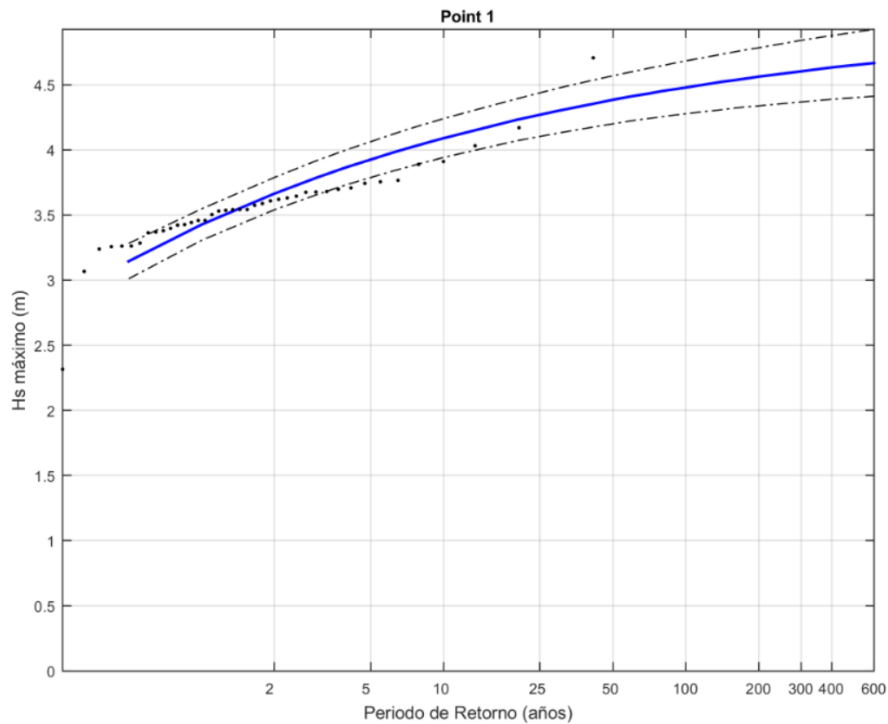


Figura 71. Régimen Extremal, Caso SWAN con canal.



Fuente: Elaboración Propia

Figura 72. Régimen Extremal, Caso MSP con canal.

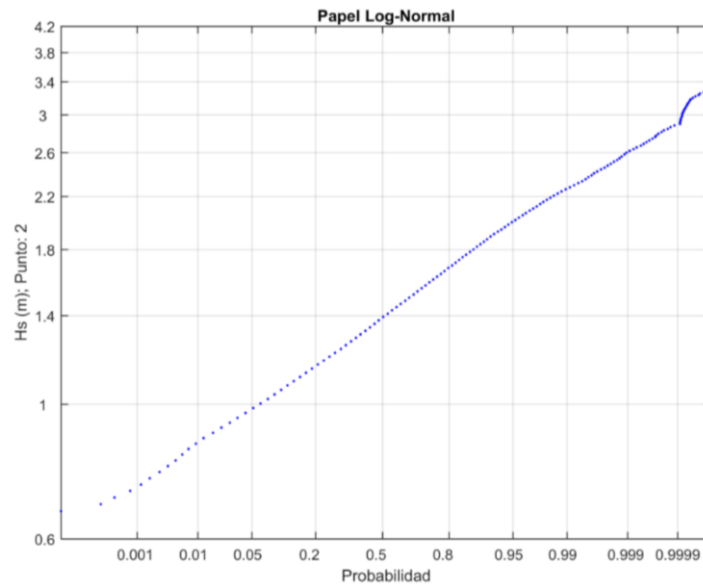


Fuente: Elaboración Propia

### 5.5.1. Punto de control 2: Centro del canal

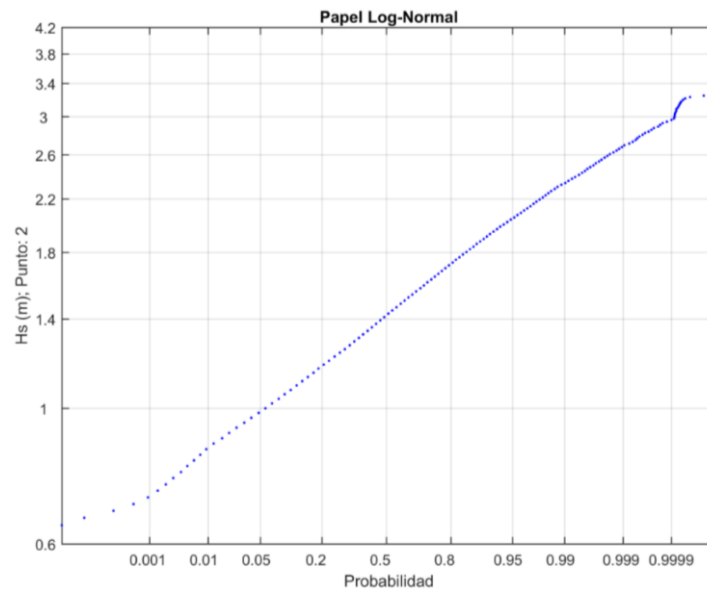
Los regímenes medios obtenidos en el punto 2 son los mostrados en las figuras siguientes.

*Figura 73. Régimen Medio, Caso SWAN sin canal.*



*Fuente: Elaboración Propia*

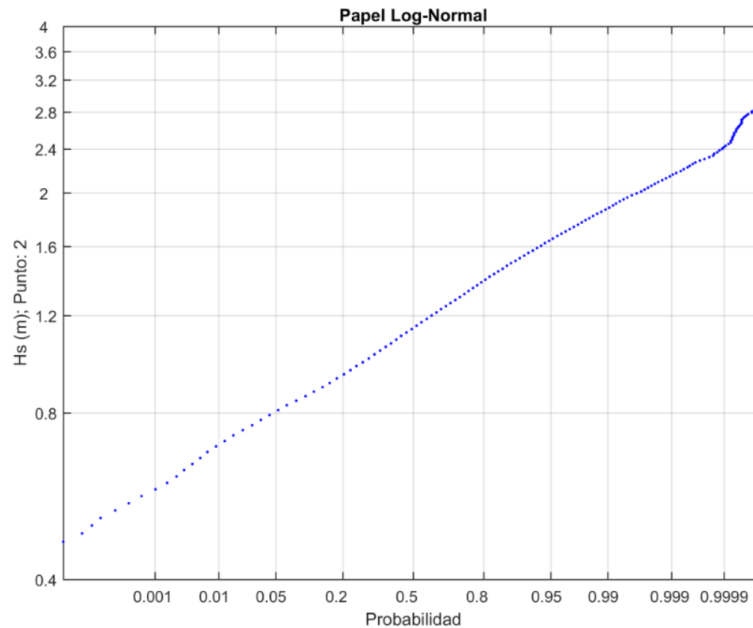
*Figura 74. Régimen Medio, Caso MSP sin canal.*



*Fuente: Elaboración Propia*

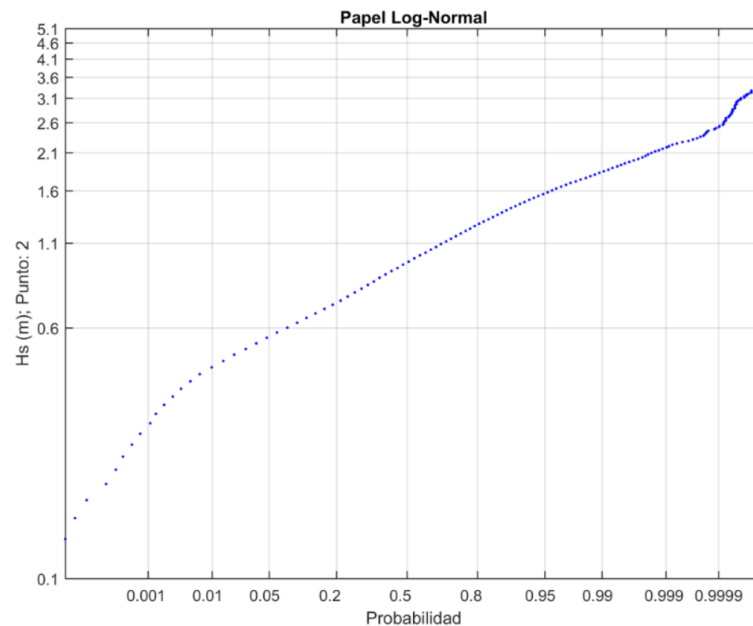
Comparando las figuras del régimen medio obtenidas para los modelos SWAN y MSP sin canal, se puede observar que son exactamente iguales. Hay una probabilidad del 50% de que la altura de ola significativa en el centro del canal sea inferior a 1.4 m y una probabilidad del 99.99% de que la altura de ola sea inferior a 3 m.

Figura 75. Régimen Medio, Caso SWAN con canal.



Fuente: Elaboración Propia

Figura 76. Régimen Medio, Caso MSP con canal.



Fuente: Elaboración Propia

Puesto que el régimen medio de un parámetro de estado de mar en un periodo de tiempo es la distribución del parámetro de estado de mar en ese periodo de tiempo, esto quiere decir que en el caso del modelo SWAN con canal la probabilidad de que la altura de ola significativa en el centro del canal sea inferior a 2.8 m es del 100%. En el caso del modelo MSP, es un 100% la probabilidad de que la altura de ola significativa en el centro del canal sea inferior a 3.1 m.

Además, en el caso SWAN hay una probabilidad del 50% de que la altura de ola significativa en el centro del canal sea inferior a 1.2 m y en el caso MSP es un 50% la probabilidad de que sea inferior a 1 m.

## 5.6. Cálculo del tamaño de piezas del dique comparativo (Diseño)

Puesto que el puerto de Ghana es un puerto comercial de uso general abierto a todo tipo de tráficos, según la ROM 0.0 & 1.0-09 la vida útil sería 50 años ( $V=50$  años), como se muestra en la Figura 77 a continuación.

Figura 77. IRE, ISA y vida útil mínima en función del tipo de área abrigada

TIPO DE ÁREA ABRIGADA O PROTEGIDA			ÍNDICE IRE <sup>7</sup>		VIDA ÚTIL MÍNIMA ( $V_m$ ) <sup>7</sup> (años)
ÁREAS PORTUARIAS	PUERTO COMERCIAL	Puertos abiertos a todo tipo de tráficos	$r_3$	Alto	50
		Puertos para tráficos especializados	$r_2(r_3)^1$	Medio (alto) <sup>1</sup>	25 (50) <sup>1</sup>
	PUERTO PESQUERO		$r_2$	Medio	25
	PUERTO NÁUTICO-DEPORTIVO		$r_2$	Medio	25
	INDUSTRIAL		$r_2(r_3)^1$	Medio (alto) <sup>1</sup>	25 (50) <sup>1</sup>
	MILITAR		$r_2(r_3)^2$	Medio (alto) <sup>2</sup>	25 (50) <sup>2</sup>
	PROTECCIÓN DE RELLENOS O DE MÁRGENES		$r_2(r_3)^3$	Medio (alto) <sup>3</sup>	25 (50) <sup>3</sup>
ÁREAS LITORALES	DEFENSA ANTE GRANDES INUNDACIONES <sup>4</sup>		$r_3$	Alto	50
	PROTECCIÓN DE TOMA DE AGUA O PUNTO DE VERTIDO		$r_2(r_3)^5$	Medio (alto) <sup>5</sup>	25 (50) <sup>5</sup>
	PROTECCIÓN Y DEFENSA DE MÁRGENES		$r_1(r_3)^6$	Bajo (alto) <sup>5</sup>	15 (50) <sup>7</sup>
	REGENERACIÓN Y DEFENSA DE PLAYAS		$r_1$	Bajo	15

Fuente: ROM 0.0 & 1.0-09

Figura 78. ISA y probabilidad conjunta de fallo para ELU y  $P_{f_{ELS}}$

TIPO DE ÁREA ABRIGADA O PROTEGIDA				ÍNDICE ISA		PfELU	PfELS
ÁREAS PORTUARIAS	COMER- CIAL	Con zonas de almacenamiento u operación de mercancías o pasajeros adosadas al dique <sup>1</sup>	Mercancías peligrosas <sup>2</sup>	s <sub>3</sub>	Alto	0.01	0.07
			Pasajeros y Mercancías no peligrosas <sup>1</sup>	s <sub>2</sub>	Bajo	0.10	0.10
		Sin zonas de almacenamiento u operación de mercancías o pasajeros adosadas al dique		s <sub>1</sub>	No significativo	0.20	0.20
	PESQUERO	Con zonas de almacenamiento u operación adosadas al dique		s <sub>2</sub>	Bajo	0.10	0.10
		Sin zonas de almacenamiento u operación adosadas al dique		s <sub>1</sub>	No signif.	0.20	0.20
	NÁUTICO- DEPORT.	Con zonas de almacenamiento u operación adosadas al dique		s <sub>2</sub>	Bajo	0.10	0.10
		Sin zonas de almacenamiento u operación adosadas al dique		s <sub>1</sub>	No signif.	0.20	0.20
	INDUS- TRIAL	Con zonas de almacenamiento u operación de mercancías o pasajeros adosadas al dique <sup>1</sup>	Mercancías peligrosas <sup>2</sup>	s <sub>3</sub>	Alto	0.01	0.07
			Mercancías no peligrosas	s <sub>2</sub>	Bajo	0.10	0.10
		Sin zonas de almacenamiento u operación de mercancías o pasajeros adosadas al dique		s <sub>1</sub>	No significativo	0.20	0.20
MILITAR	Con zonas de almacenamiento u operación adosadas al dique <sup>1</sup>		s <sub>3</sub>	Alto	0.01	0.07	
	Sin zonas de almacenamiento u operación adosadas al dique		s <sub>1</sub>	No signif.	0.20	0.20	
PROTEC- CIÓN *	Con zonas de almacenamiento adosadas al dique <sup>1</sup>	Mercancías peligrosas <sup>2</sup>	s <sub>3</sub>	Alto	0.01	0.07	
		Mercancías no peligrosas	s <sub>2</sub>	Bajo	0.10	0.10	
ÁREAS LITORALES	DEFENSA ANTE GRANDES INUNDACIONES <sup>3</sup>			s <sub>4</sub>	Muy alto	0.0001	0.07
	PROTECCIÓN DE TOMA DE AGUA O PUNTO DE VERTIDO			s <sub>2</sub> (s <sub>3</sub> ) <sup>4</sup>	Bajo (alto) <sup>4</sup>	0.10 0.0001	0.10 0.07
	PROTECCIÓN Y DEFENSA DE MÁRGENES			s <sub>2</sub> (s <sub>4</sub> ) <sup>5</sup>	Bajo (muy alto) <sup>5</sup>	0.10 0.0001	0.10 0.07
	REGENERACIÓN Y DEFENSA DE PLAYAS			s <sub>1</sub>	No signif.	0.20	0.20

Fuente: ROM 0.0 & 1.0-09

Entrando en la Figura 78, para un puerto comercial con zonas de almacenamiento u operación de mercancías o pasajeros adosadas al dique, de pasajeros y mercancías no peligrosas, la probabilidad de fallo  $P_{f_{ELU}} = 0,1$ .

Por tanto, con la vida útil de 50 años y la probabilidad de fallo 0,1 se obtiene el siguiente periodo de retorno:

$$T = \frac{1}{1 - (1 - P_{f_{ELU}})^{\frac{1}{V}}} = \frac{1}{1 - (1 - 0,1)^{\frac{1}{50}}} = 475 \text{ años}$$

Una vez obtenido el periodo de retorno de 475 años, con el régimen extremal en el morro que se ha mostrado en apartados anteriores, se obtienen las alturas de ola correspondientes en los casos sin canal y con canal para los modelos SWAN y MSP. Con estas alturas de ola se calcula el peso de las piezas del dique en cada caso (ver Tabla 18).

### CÁLCULO DEL PESO DE LAS PIEZAS DEL MANTO PRINCIPAL DEL DIQUE

El peso de las piezas del manto principal de un dique se puede determinar mediante la formulación de Losada y Jiménez-Curto (1979):

$$W_{50}(kg) = \Psi \times \rho_w \times R \times H_{50}^3$$

Donde:

$\rho_w$  = peso específico del agua = 1025 kp/m<sup>3</sup>

$\Psi$  = función de estabilidad, Tabla 17.

$$R = \frac{S_r}{(S_r - 1)^3}$$

$$S_r = \frac{\rho_s}{\rho_w}$$

$\rho_s$  = densidad de los hormigones en masa = 2300 kg/m<sup>3</sup>

$H_{50}$  = Altura de ola

Tabla 17. Valores máximos de la función de estabilidad,  $\Psi$ . Bloques paralelepípedicos de hormigón. De Losada y Desiré (1985).

TIPO BLOQUE	a x a x a	a x a x 1.5a	a x a x 2 <sup>a</sup>
<u>Cotan <math>\alpha</math></u>	1.5 2.0 2.5	1.5 2.0 2.5	1.5 2.0 2.5
<u>Inicio avería</u>	0.060 0.047 0.043	----- 0.084	0.120 ---- 0.116
<u>Avería Iribarren</u>	0.033 0.028 0.024	----- 0.030	0.042 ---- 0.038
<u>Destrucción</u>	0.027 0.022 0.018	----- 0.021	0.035 ---- 0.027

Fuente: Apuntes del Máster de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

En este caso:

$$S_r = \frac{\rho_s}{\rho_w} = \frac{2300}{1025} = 2,24$$

$$R = \frac{S_r}{(S_r - 1)^3} = \frac{2,24}{(2,24 - 1)^3} = 1,166 \text{ para bloques de hormigón}$$

El valor de la función de estabilidad  $\Psi$  para un tipo bloque "a x a x a", talud 2/1 (cotan $\alpha$ =2) e inicio de avería es 0,047 ( $\Psi$  = 0,047).

Luego el peso de los bloques cúbicos será:

$$W_{50}(kg) = 0,047 \times 1025 \times 1,166 \times H_{50}^3$$

#### 5.6.1. SWAN sin canal

Con el régimen extremal en el morro (punto de control 1) mostrado previamente en la Figura 69, entrando con el periodo de retorno de 475 años, se obtiene una altura de ola en el caso SWAN sin canal:  $H_s = 3,3 \text{ m} = H_{50}$ .

Por tanto, en este caso el peso de los bloques cúbicos será:



$$W_{50}(kg) = 0,047 \times 1025 \times 1,166 \times 3,3^3 = 2018$$

El lado del cubo equivalente  $D_{50}$  es:

$$D_{50}(m) = \sqrt[3]{\frac{W_{50}}{\rho_s}} = \sqrt[3]{\frac{2018}{2300}} = 0,96$$

Y el espesor del manto principal exterior sería  $2 \cdot D_{50} = 1,91$  metros.

### 5.6.2. MSP sin canal

Con el régimen extremal en el morro (punto de control 1) mostrado previamente en la Figura 70, entrando con el periodo de retorno de 475 años, se obtiene una altura de ola en el caso MSP sin canal:  $H_s = 3,3$  m.

Por tanto, en este caso el peso de los bloques cúbicos será:

$$W_{50}(kg) = 0,047 \times 1025 \times 1,166 \times 3,3^3 = 2018$$

El lado del cubo equivalente  $D_{50}$  es:

$$D_{50}(m) = \sqrt[3]{\frac{W_{50}}{\rho_s}} = \sqrt[3]{\frac{2018}{2300}} = 0,96$$

Y el espesor del manto principal exterior sería  $2 \cdot D_{50} = 1,91$  metros.

### 5.6.3. SWAN con canal

Con el régimen extremal en el morro (punto de control 1) mostrado previamente en la Figura 71, entrando con el periodo de retorno de 475 años, se obtiene una altura de ola en el caso SWAN con canal:  $H_s = 3,9$  m.

Por tanto, en este caso el peso de los bloques cúbicos será:

$$W_{50}(kg) = 0,047 \times 1025 \times 1,166 \times 3,9^3 = 3332$$

El lado del cubo equivalente  $D_{50}$  es:

$$D_{50}(m) = \sqrt[3]{\frac{W_{50}}{\rho_s}} = \sqrt[3]{\frac{3332}{2300}} = 1,13$$

Y el espesor del manto principal exterior sería  $2 \cdot D_{50} = 2,26$  metros.

### 5.6.4. MSP con canal

Con el régimen extremal en el morro (punto de control 1) mostrado previamente en la Figura 72, entrando con el periodo de retorno de 475 años, se obtiene una altura de ola en el caso MSP con canal:  $H_s = 4,7$  m.

Por tanto, en este caso el peso de los bloques cúbicos será:

$$W_{50}(kg) = 0,047 \times 1025 \times 1,166 \times 4,7^3 = 5831$$

El lado del cubo equivalente  $D_{50}$  es:

$$D_{50}(m) = \sqrt[3]{\frac{W_{50}}{\rho_s}} = \sqrt[3]{\frac{5831}{2300}} = 1,36$$

Y el espesor del manto principal exterior sería  $2 \cdot D_{50} = 2,73$  metros.

## 6. CONCLUSIONES GENERALES

Tras la ejecución del caso real y el posterior cálculo del tamaño de piezas del dique en cada caso, resumido en la Tabla 18, se llegan a las siguientes conclusiones.

Tabla 18. Tabla final de resultados en los escenarios ( $H_s$ ,  $W_{50}$ ,  $D_{50}$ )

		$H_s$ diseño (m)	$W_{50}$ (kg)	$D_{50}$ (m)
Escenario 1	<b>SWAN sin canal</b>	3,3	2018	0,96
Escenario 2	<b>SWAN con canal</b>	3,9	3332	1,13
Escenario 3	<b>MSP sin canal</b>	3,3	2018	0,96
Escenario 4	<b>MSP con canal</b>	4,7	5831	1,36

*Fuente: Elaboración propia*

En primer lugar, puesto que la altura de ola significativa de diseño ( $H_s$  diseño) que se obtiene en el morro (punto de control 1) con ambos modelos SWAN y MSP en el caso sin canal es exactamente igual, se demuestra que los dos modelos se comportan de forma parecida, y por lo tanto el peso de las piezas del dique en los escenarios 1 y 3 es el mismo (2018 kg).

En segundo lugar, queda demostrado que la presencia del canal afecta a la altura de ola significativa ( $H_s$  diseño) y por lo tanto al peso de las piezas del dique, ya que como se puede observar en la Tabla 18, la  $H_s$  de diseño pasa de ser igual a 3,3 m en el caso sin canal a 3,9 m en el caso SWAN y 4,7 m en MSP. La presencia del canal representa la necesidad de incorporar 3813 kg más a las piezas del dique (más del doble de lo que se necesitaba en el caso sin canal). Además, también se demuestra que el modelo SWAN con canal subestima la altura de ola significativa de diseño (con el modelo MSP se obtiene casi 1 metro más de altura de ola en el morro del dique).

Tras el experimento teórico, se concluyó que el modelo SWAN no mostraba todos los procesos esperados, subestimaba las condiciones del oleaje. SWAN resuelve muy bien el asomeramiento, la refracción y la propagación del oleaje, pero resuelve mal la difracción. Sin embargo, el modelo MSP resuelve muy bien la difracción. Por tanto, el modelo MSP propaga mejor el oleaje. Esto coincide con los resultados obtenidos en el caso real de Ghana.

En conclusión, todo esto significa que la hipótesis inicial de este trabajo está bien planteada, es decir, que los estudios que se realizan con el modelo SWAN para clima marítimo de cara al diseño son correctos siempre y cuando no haya efectos locales por el canal. En el momento que se incorpora un canal de navegación, las condiciones de oleaje cambian y será necesario aumentar el tamaño de las piezas del dique.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- Misra, S. K., Driscoll, A.M., Kirby, J.T., Cornett, A., Lomonaco, P., Sayao, O., y Yavary, M. (2008). "Surface gravity wave interactions with deep-draft navigation channels – physical and numerical modelling case studies", Proc. 31st International Conference Coastal Engineering. Hamburgo, 31 Agosto – 5 Septiembre, 2786–2798.
- Dusseljee, D. W., Klopman, G., Van Vledder, G. Ph., y Riezebos, H. J. (2014). "Impact of harbor navigation channels on waves: a numerical modelling guideline", 34th International Conference on Coastal Engineering. Seoul.
- Van der Ven, P., Reijmerink, B., Van der Hout, A. y De Jong, M. (2018). "Comparison of validation studies of wave-penetration models using open benchmark datasets of deltas", PIANC-World Congress 2018. Panamá.
- Grey, S. M., Cruickshank, I. C., Beresford, P. J. y Tozer, N. P. (2010). "The impact of navigation channels on berth protection" en Proceedings of the ICE – Civil Engineering. Vol. 163 (5), pp. 49-54.  
<[https://www.researchgate.net/publication/245408128\\_The\\_impact\\_of\\_navigation\\_channels\\_on\\_berth\\_protection](https://www.researchgate.net/publication/245408128_The_impact_of_navigation_channels_on_berth_protection)> [Consulta: 7 de agosto de 2019]
- Van der Molen, W., Scott, D. y Taylor, D. (2015). "Long wave propagation into dredged areas", E-proceedings of the 36th IAHR World Congress 28 Junio – 3 Julio 2015. La Haya.
- Ten Oever, E., Overbeek, J., Muilwijk, M. P., Muttray, M. y Shrinivas, P. (2010). "Design of Port@Lekki", 12th Triannual International Conference on Ports. Florida.
- Monteban, D. (2016). *Numerical modelling of wave agitation in ports and Access channels – A comparison study between SWASH and MIKE 21bw*. Tesis. Delft: Delft University of Technology.
- White, N. y Simpson, M. (2004). "Poole harbour approach channel deepening and beneficial use of dredged material EIA – Environmental Scoping Study". Reino Unido.
- Guzman Mardones, C. A. (2011). *Impact of access channel geometry on wave penetration in harbours*. Tesis. Delft: Delft University of Technology. Faculty of Civil Engineering and Geosciences.
- Reguero, B.G., Menéndez, M., Méndez, F.J., Mínguez, R. y Losada, I.J. (2012). "A Global Ocean Wave (GOW) calibrated reanalysis from 1948 onwards" en *Coastal Engineering*, Vol 65, pp. 38-55. Disponible en <<https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2012.03.003>> [Consulta: 8 de enero de 2020]

- Zwamborn, J.A. y Grieve, G. (1974). "Wave attenuation and concentration associated with harbour approach channels" en *14th International Conference on Coastal Engineering*. Copenhagen. 24-28. Disponible en <<https://doi.org/10.1061/9780872621138.123>> [Consulta: 30 de enero de 2020]
- Transeop (2019). Curiosidades sobre el transporte marítimo de mercancías [Consulta: 7 de agosto del 2019] <<https://www.transeop.com/blog/curiosidades-sobre-el-transporte-maritimo-de-mercancias/122/>>
- UNCTAD (2018). Informe sobre el transporte marítimo. Conferencia de las naciones unidas sobre comercio y desarrollo. Nueva York y Ginebra. (eISBN 978-92-1-047243-2)
- PIANC 'Setting the course' (2014). *Harbour approach channels - design guidelines*. Report N°121.
- Puertos del Estado (España) (1999) Recomendaciones para obras marítimas. ROM 0.0. "Procedimiento general y bases de cálculo en el proyecto de obras marítimas y portuarias".
- Puertos del Estado (España) (2009) Recomendaciones para obras marítimas, serie I. ROM 1.0-09. Recomendaciones del diseño y ejecución de las Obras de Abrigo (Parte 1ª. Bases y Factores para el proyecto. Agentes climáticos).
- Puertos del Estado (España) (1999). Recomendaciones para obras marítimas. ROM 3.1-99. "Proyecto de la configuración marítima de los puertos, canales de acceso y áreas de flotación".
- SWAN Scientific and technical documentation - SWAN Cycle III versión 41.31 (1993-2019). Delft University of Technology.
- Camus, P., Mendez, F.J., Medina, R., Tomas, A. e Izaguirre, C. (2013) "High resolution downscaled ocean waves (DOW) reanalysis in coastal areas", en *Coastal Engineering*, Vol 72, pp. 56-68. <<https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2012.09.002>> [Consulta: 8 de enero de 2020]

